ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ЭПС

Рекомендовано
ФГАУ «Федеральный институт развития образования»
к исполозованию в качестве учебного пособия в учебном процессе
образовательных учреждений, реализующих программы СПО
по специальности 23.02.06 «Техническая эксплуатация
подвижного состава железных дорог».
Регистрационный номер рецензии 387 от 28 ноября 2016 г.

Москва
2017

УДК 621.313:629.423
ББК 31.261:39.232
Д14

Рецензент: преподаватель Брянского колледжа железнодорожного транспорта — филиала МИИТа *А.А. Порошин*

Дайлидко А.А.
Д14 Электрические машины ЭПС: учеб. пособие. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. — 245 с.
ISBN 978-5-89035-997-1

Изложены основные сведения об устройстве и режимах работы электрических машин, используемых на железнодорожном электроподвижном составе. Рассмотрены теоретические основы и принципы действия тяговых и общепромышленных электродвигателей постоянного и переменного тока, генераторов, трансформаторов, вспомогательных машин, преобразователей и аккумуляторных батарей, их параметры, характеристики и конструктивные исполнения. Освещены вопросы технического обслуживания и ремонта электрических машин, трансформаторов и аккумуляторных батарей ЭПС, приведены основные правила охраны труда при их эксплуатации.

Предназначено для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта специальности «Техническая эксплуатация подвижного состава железных дорог» и может быть полезно инженерно-техническим работникам локомотивных депо, а также локомотивным бригадам.

УДК 621.313:629.423
ББК 31.261:39.232

ISBN 978-5-89035-997-1

Глава 1. НАЗНАЧЕНИЕ, КЛАССИФИКАЦИЯ И МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1.1. Общие сведения об электрических машинах

Началом создания электрических машин следует считать открытие М. Фарадеем закона электромагнитной индукции и последующие работы в этой области Дж. Максвелла, Э. Ленца, М.О. Доливо-Добровольского и др. Большой вклад в развитие теории работы электрических машин внесли советские ученые А.Е. Алексеев, Б.П. Апаров, А.И. Вольдек, А.В. Иванов-Смоленский, М.П. Костенко, К.А. Круг, С.И. Курбатов, Л.М. Пиотровский и др.

Современный этап развития человеческой цивилизации немыслим без применения электрической энергии. Львиную долю электроэнергии потребляет железнодорожный транспорт.

Электрические машины преобразуют электрическую энергию в механическую и механическую в электрическую, а также одну форму электрической энергии в другую, отличающуюся по напряжению, току, частоте. Электрическая машина, в отличие от других электромеханических преобразователей, совершает непрерывный процесс преобразования энергии.

Генератором называют электрическую машину, преобразующую механическую энергию в электрическую, а *электродвигателем* — электрическую машину, преобразующую электрическую энергию в механическую. Основное отличие этих электрических машин в том, что они обратимы, т.е. одна и та же машина может работать как правило и в режиме двигателя и в режиме генератора. *Преобразователем* называют электрическую машину, преобразующую одну форму электрической энергии в другую, изменяя величину напряжения переменного и постоянного тока, частоту, число фаз и другие параметры. Однако существуют *электромашинные преобразователи*, преобразующие переменный ток в постоянный или переменный ток промышленной частоты в ток более высокой частоты. Кроме того, электрические машины используют для уси-

ления мощности электрических сигналов. Подобные машины называют *электромашинными усилителями*. Для повышения коэффициента мощности (cos *j*) также используют *синхронные компенсаторы*.

Неподвижная часть машины является *статором*, а вращающаяся — *ротором*. Такие машины называют одномерными. В отдельных случаях могут вращаться обе части — эти машины называют двухмерными. Почти все выпускаемые промышленностью машины являются одномерными с цилиндрическим вращающимся ротором и внешним неподвижным статором. Находят применение также электрические машины, в которых ротор имеет форму диска. Такие машины называют торцевыми. У линейных двигателей ротор относительно статора совершает линейное или возвратно-поступательное движение.

Непременным условием преобразования энергии электрической машины является изменение потокосцепления обмоток в зависимости от положения ее частей статора и ротора. Преобразование энергии в них осуществляется в магнитном поле.

На каждой электрической машине имеется металлическая паспортная табличка, на которой указаны: завод-изготовитель, год выпуска, класс изоляции, масса машины и номинальные данные, характеризующие основные энергетические показатели и условия работы машины, на которые она рассчитана. Кроме того, там же указаны энергетические показатели — мощность, напряжение, ток, частота вращения, частота переменного тока, коэффициент полезного действия (КПД), число фаз, коэффициент мощности и режим работы (длительный, кратковременный и т.п.).

Тяговые машины характеризуются двумя режимами работы — часовым и продолжительным. *Часовой* называют мощность, с которой двигатель может работать в течение одного часа, за это время его обмотки нагреваются под действием тока до предельно допустимой температуры. *Продолжительной* называют мощность, с которой двигатель может работать в течение длительного времени, при этом температура нагрева его отдельных частей не превысит допустимую.

Трансформаторы не имеют вращающихся частей и являются статическими преобразователями электроэнергии переменного тока. Однако принцип действия трансформаторов и электри-

ческих машин одинаковый и основан на явлении электромагнитной индукции.

Классификация электрических машин. По *назначению* электрические машины подразделяются на электродвигатели, генераторы, электромашинные и электромеханические преобразователи, компенсаторы.

По *роду тока* электрические машины делят на машины постоянного и переменного тока.

По *принципу действия* электрические машины разделяются на коллекторные и бесколлекторные. К коллекторным машинам относятся машины постоянного тока и универсальные машины, работающие как от сети постоянного, так и от сети переменного тока. Бесколлекторные машины — это всегда машины переменного тока: синхронные и асинхронные.

По *мощности* электрические машины условно подразделяют на микромашины, машины малой, средней и большой мощности.

Номинальной мощностью электрической машины называют мощность, на которую рассчитана данная машина по условиям нагрева и безаварийной работы в течение установленного срока службы. В реальных условиях машина может работать и при неноминальных условиях (уменьшенная или увеличенная мощность; напряжение и ток, отличающиеся от номинальных и т.д.). Однако при этом будут отличаться и энергетические показатели машины: при небольших нагрузках (меньше номинальных) будут меньше КПД и коэффициент мощности, а при нагрузках больше номинальных — увеличится нагрев машины, что может привести к преждевременному выходу из строя изоляции обмоток и, следовательно, всей машины.

Микромашины имеют мощность от долей ватта до 500 Вт. Эти машины работают как на постоянном, так и на переменном токе нормальной и повышенной (400—2000 Гц) частоты.

Машины малой мощности — от 0,5 до 10 кВт — также могут работать как на постоянном, так и на переменном токе нормальной или повышенной частоты.

Машины средней мощности — рассчитаны на мощность от 10 до нескольких сотен кВт, а *машины большой мощности* — свыше нескольких сотен кВт.

В зависимости от *частоты вращения* машины условно подразделяют на: *тихоходные* с частотами вращения до 300 об/мин; *сред-*

ней быстроходности — 300—1500 об/мин; *быстроходные* — 1500—6000 об/мин; *сверхбыстроходные* — свыше 6000 об/мин.

По *степени защиты* от внешних воздействий различают следующие виды исполнения электрических машин:

– открытое исполнение — машина не имеет специальных приспособлений, которые предохраняют от попадания внутрь посторонних предметов, а также от прикосновения обслуживающего персонала к токоведущим и вращающимся частям. На электровозах ВЛ80 всех индексов открытые асинхронные машины применяют в качестве привода компрессоров, вентиляторов;

– защищенное — машина имеет специальные приспособления, необходимые для циркуляции воздуха, охлаждающего машину — соответствующие крышки, кожухи, сетки и пр. Такие машины не имеют приспособлений, защищающих от дождя. Их применяют в качестве расщепителей фаз и других вспомогательных машин ТПС и устанавливают в кузовах электровозов;

– брызгозащищенное — машина обеспечена приспособлениями, защищающими машину от дождя и водяных брызг, падающих сверху или с любой из четырех сторон под углом до 45° к вертикали. Брызгозащищенные машины могут устанавливаться на открытом воздухе;

– каплезащищенное — машина защищена от попадания внутрь машины вертикально падающих капель;

– водозащищенное — машина недоступна проникновению внутрь струй воды любого направления (также и снизу). В ней предусмотрены усиленные уплотнения резиновыми прокладками и сальниками. Случайно попавшая в машину вода вытекает из нее или удаляется охлажденным воздухом;

– пылезащищенное — машина защищена от попадания внутрь пыли в опасных для нормальной работы количествах;

– закрытое — внутреннее пространство машины изолировано от внешней среды. Большинство вспомогательных машин, а также тяговые электродвигатели электровозов выполнены закрытыми;

– герметичное — машина выполняется с особо плотной изоляцией от окружающей среды, предотвращающей сообщение ее с внутренним пространством при определенной разности давлений снаружи и внутри машины. В качестве примера можно привести

масляный электронасос тягового трансформатора электровозов переменного тока;

— взрывозащищенное (взрывобезопасное) — машина может работать во взрыво- и пожароопасной среде.

Кроме того, машины могут иметь следующие специальные исполнения: влагостойкое, морозостойкое, тропическое и др.

Классификация трансформаторов рассмотрена в разделе «Трансформаторы».

1.2. Материалы для изготовления электрических машин

Материалы, применяемые в электромашиностроении, подразделяют на три категории — конструкционные, активные и изоляционные.

Конструкционные материалы применяют для изготовления частей и деталей машин, воспринимающих и передающих механические нагрузки (валы, станины, подшипниковые щиты, стояки и различные крепежные детали и т.д.). В качестве конструкционных материалов применяют сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы, а также пластмассы. Корпуса машин постоянного тока изготовляют из низколегированной стали. Валы машин выполняют из высокопрочных конструкционных сталей.

Активные материалы могут быть двух видов — проводниковые и магнитные. В качестве проводниковых материалов используют медь и рафинированный алюминий.

Медь, применяемая в качестве электрических проводников, не должна содержать больше 0,1 % примесей, при этом наибольшее вредное воздействие оказывают на электропроводимость примеси висмута и сурьмы. Медь значительно дороже алюминия, но для изготовления обмоток тяговых машин ее применяют практически постоянно из-за более высокой электропроводности по сравнению с алюминием (примерно в 1,6 раза), что позволяет уменьшить габариты машины. Медные сплавы используют также для изготовления вспомогательных токопроводящих частей (контактные кольца, коллекторные пластины, болты и т.д.).

Алюминий имеет большее удельное сопротивление, чем медь, поэтому габаритные размеры электрических машины с алюминиевыми обмотками получаются больше, чем с медными, так как тре-

буется большее сечение проводников, а это ведет к увеличению пазов якоря, габаритов обмоток возбуждения и т.д.

В качестве магнитопроводов используют различные ферромагнитные материалы: электротехническую сталь, чугун, стальное литье, листовую и кованую сталь, специальные сплавы.

Физические свойства и сортамент электротехнической стали регламентированы ГОСТ 21427.0—75. В электрических машинах применяют электротехнические стали марок 1211, 1212, 1213, 1311, 1411, 1412, 1511, 1512, 3411, 3413. Здесь первая цифра обозначает класс стали по структурному состоянию и виду прокатки: 1 — горячекатаная изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой. Вторая цифра показывает содержание кремния. Цифрой 2 обозначают содержание кремния, равное 0,8—1,8 %; цифра 3 — 1,8—2,8 %; цифра 4 — 2,8–3,8 %; цифра 5 — 3,8–4,8 %. Третья цифра указывает группу по основной нормируемой характеристике: 0 — удельные потери при магнитной индукции $B = 1,7\ T$ и частоте 50 Гц; 1 — удельные потери при $B = 1,5\ T$ и частоте 50 Гц; 2 — удельные потери при $B = 1,0\ T$ и частоте 400 Гц; 6 — магнитная индукция в слабых полях при напряженности поля 10 А/м. Четвертая цифра — порядковый номер стали.

При увеличении кремния ухудшаются механические свойства стали, так как увеличивается ее хрупкость. В то же время кремний улучшает магнитные свойства: во-первых, он способствует переводу имеющегося в стали углерода из цементита в графит, что способствует снижению потерь на гистерезис, и во-вторых, увеличивает электрическое сопротивление стали, что уменьшает потери на вихревые токи.

Обычно применяют листовую электротехническую сталь толщиной 0,5 и 0,35 мм, а также в виде рулонной ленты.

По *способу обработки* различают горячекатаную и холоднокатаную сталь. Горячекатаная сталь имеет одинаковое магнитное сопротивление во всех направлениях прокатки, а холоднокатаная — меньшее магнитное сопротивление вдоль направления прокатки.

Изоляционные материалы, применяемые для изоляции токоведущих частей электрических машин, могут быть твердыми, жидкими и газообразными. Газообразными считают воздух и водород, кото-

рые являются изоляторами и в то же время охлаждают узлы и детали электрических машин. В качестве жидких диэлектриков применяют трансформаторное масло, хорошо охлаждающее мощные трансформаторы. Твердые изоляционные материалы можно разделить на четыре группы:

– естественные органические волокнистые материалы — шелк, хлопчатая бумага, материалы на основе древесной целлюлозы;

– неорганические материалы — слюда, стекловолокно, асбест;

– различные синтетические материалы в виде смол, пленок, листового материала и т.д.;

– различные эмали, лаки, компаунды на основе природных и синтетических материалов.

Пропитка компаундами служит такой же цели, как и пропитка лаками. Отличие заключается только в том, что компаунды не имеют летучих растворителей, а представляет собой консистентную массу, которая при нагревании размягчается, сжижается и способна под давлением проникать в поры изоляции. Заполнение пор изоляции будет более плотным.

Международные и отечественные стандарты классифицируют изоляционные материалы на семь классов со следующими предельно допустимыми температурами:

Класс изоляции	Y	A	E	B	F	H	C
Предельно допустимые температуры, °C	90	105	120	130	155	180	Более 180

Требования к нагревостойкости заключаются в том, чтобы изоляция при повышении температур не меняла своих свойств.

К классу Y относятся непропитанные жидкими диэлектриками волокнистые материалы из хлопчатой бумаги, целлюлозы, шелка и из синтетических материалов, таких как полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид и др. Этот класс изоляции в тяговых электрических машинах не применяется.

К классу A отнесены различные лакоткани, ленты, электротехнический картон, гетинакс, текстолит, а также волокнистые материалы из хлопчатой бумаги, целлюлозы и шелка, пропитанные жидкими диэлектриками. К данному классу отнесены эмаль провода на основе масляных и полиамиднорезольных лаков, полиамидных пленок, а также пропитанное дерево и древесные слоистые плас-

тики. Изоляция класса А применяется в трансформаторах и электрических машинах мощностью свыше 100 кВт.

Класс Е включает в себя эмаль проводов и электрическую изоляция на основе поливинилацеталевых (винифлекс, металвин), полиуретановых, эпоксидных, полиэфирных (лавсан) смол и других синтетических материалов с аналогичной нагревостойкостью. Класс Е включает в себя новые синтетические материалы этой нагревостойкости.

К классу В относятся изоляционные материалы на основе тонкой щипаной слюды (микалента, микафолий, миканит), неорганических диэлектриков (слюда, асбест, стекловолокно) и клеящих, пропиточных и покровных лаков и смол повышенной нагревостойкости органического происхождения, причем содержание органических веществ по массе не должно превышать 50 %. Сюда же относятся слюдинитовые материалы, в основе которых лежит непрерывная слюдинитовая лента из пластинок слюды размерами до нескольких миллиметров и толщиной в несколько микрон, а также полиэфирные смолы на основе фталевого ангидрида, полихлортрифторэтилен (фторопласт-3), некоторые полиуретановые смолы и др. Изоляция класса В широко применяется в тяговых электрических машинах.

Класс F объединяет изоляционные материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, но с применением органических лаков и смол, модифицированных кремнийорганическими (полиорганосилоксановыми) и другими смолами с высокой нагревостойкостью, или же с применением других синтетических смол соответствующей нагревостойкости (полиэфирные смолы на основе изо- и терефталевой кислот и др.).

К классу Н относится изоляция на основе слюды, стекловолокна и асбеста в сочетании с кремнийорганическими (полиорганосилоксановыми), полиорганометаллосилоксановыми и другими нагревостойкими смолами. С применением этих смол изготовляют миканиты и слюдиниты, а также стекломиканиты, стеклоткани и стеклотекстолиты. К этому классу относится изоляция на основе политетрафторэтилена (флоропласт-4).

К классу изоляции С принадлежат слюда, кварц, стекловолокно, стекло, фарфор и другие керамические материалы, применяемые без органических связующих или с неорганическими связующими.

1.3. Расчет потери энергии, КПД и нагрев/охлаждение электрических машин

Мощность электрических машин. Потребляемая мощность машин постоянного тока определяется произведением тока на напряжение:

$$P = UI. \qquad (1.1)$$

Мощность трехфазных машин переменного тока:

$$P = 3U_ф I_ф \cos \varphi, \qquad (1.2)$$

где $U_ф$ и $I_ф$ — фазовый ток и фазовое напряжение;
φ — угол сдвига фаз между фазовым током и фазовым напряжением.

Мощность трехфазных машин также может быть выражена через линейный ток $I_л$ и линейное напряжение $U_л$:

$$P = \sqrt{3}\, U_л I_л \cos \varphi. \qquad (1.3)$$

Мощность однофазных машин переменного тока:

$$P = UI\cos \varphi, \qquad (1.4)$$

где U и I — эффективные значения тока и напряжения;
$\cos \varphi$ — коэффициент мощности.

Потери в электрических машинах. При работе электрической машины в режиме генератора или двигателя часть потребляемой ею энергии бесполезно теряется в виде тепла. Мощность потерянной энергии называют *потерями мощности* или просто *потерями.*

Электрические потери являются переменными, так как зависят от тока нагрузки. Их рассчитывают по формуле Джоуля—Ленца

$$P_{эл} = I^2 r, \qquad (1.5)$$

где I — ток электрической машины, А;
r – активное сопротивление обмотки, Ом.

Потери в обмотке якоря:

$$P_а = I_а^2 r, \qquad (1.6)$$

где r — сопротивление обмоток цепи якоря.

Потери в обмотках возбуждения главных полюсов:

$$P_в = U_в I_в. \qquad (1.7)$$

Потери в переходных сопротивлениях щеточных контактов:

$$P_щ = U_щ I_щ. \qquad (1.8)$$

Суммарные электрические потери:

$$P_{эл} = P_а + P_в + P_щ. \qquad (1.9)$$

Магнитные потери — это потери на гистерезис и вихревые токи, вызванные перемагничиванием сердечников.

Потери на гистерезис появляются при циклическом перемагничивании, которое происходит в трансформаторах и зубцовом слое электрических машин. В этом случае вектор магнитной индукции изменяется от нуля до максимального значения.

При вращательном перемагничивании стали также имеют место потери на гистерезис. Индукция в сердечниках машин обычно составляет меньше 1,5 Тл. Опытным путем установлено, что потери при вращательном перемагничивании больше в среднем в 1,8 раза, чем при циклическом перемагничивании.

При перемагничивании стали в ней индуктируется ЭДС, направление которой определяется по правилу «правой руки». Эта ЭДС создает такого же направления токи, так называемые вихревые токи, которые способствуют нагреванию стали. Для уменьшения этих потерь элементы магнитопроводов собирают из отдельных листов, изолированных друг от друга.

На вращающемся якоре имеются пазы и зубцы, вследствие чего возникают дополнительные потери в сердечниках полюсов машин постоянного тока.

Все потери в стали суммируются.

Механические потери $P_{мех}$ — это потери от трения в подшипниках $P_п$, трения щеток о коллектор $P_к$ и потери на вентиляцию $P_{вен}$.

$$P_{мех} = P_п + P_к + P_{вен}. \qquad (1.10)$$

Добавочные потери $P_{доб}$ зависят от значения основного магнитного потока машины и вызваны зубчатым строением сердечников. К ним относятся потери от вихревых токов, а также в меди обмоток и др. Добавочные потери учесть почти невозможно, но они небольшие, и на основании опытных данных их обычно принимают равными 1 % номинальной мощности.

Полные или суммарные потери:

$$\Delta P = P_{эл} + P_м + P_{мех} + P_{доб}. \qquad (1.11)$$

Сумма магнитных и механических потерь составляют потери холостого хода:

$$P_0 = P_м + P_{мех}. \qquad (1.12)$$

Подводимая к машине мощность:

для генератора:

$$P_{1\text{ген}} = 0{,}105\, M_1\, n \tag{1.13}$$

или

$$P_{1\text{ген}} = M_1\, \varphi; \tag{1.14}$$

для двигателя:

$$P_{1\text{дв}} = UI. \tag{1.15}$$

Выходная мощность:

для генератора:

$$P_{2\text{ген}} = UI; \tag{1.16}$$

для двигателя:

$$P_{2\text{дв}} = 0{,}105\, M_2\, n. \tag{1.17}$$

Коэффициент полезного действия (КПД) определяется как отношение полезной или отдаваемой мощности P_2 к потребляемой мощности P_1:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \tag{1.18}$$

или в %:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\ \%. \tag{1.19}$$

Для генератора:

$$\eta = \frac{P_2}{UI + \Delta P} = \frac{UI}{UI + \Delta P} = \frac{1 - \Delta P}{UI + \Delta P}; \tag{1.20}$$

для двигателя:

$$\eta = \frac{UI - \Delta P}{UI} = 1 - \frac{\Delta P}{UI}. \tag{1.21}$$

Электрические машины имеют самый высокий КПД среди других машин. Так, у машин постоянного тока мощностью от 1 до 100 кВт КПД составляет 0,7—0,9, свыше 100 кВт — 0,9—0,97.

Нагрев электрических машин. Как отмечалось выше, все потери энергии в электрической машине преобразуются в теплоту Q, при

этом одна часть теплоты Q_1 расходуется на повышение температуры машины, а другая Q_2 — отдается в окружающую среду:

$$Q = Q_1 + Q_2. \qquad (1.22)$$

Для анализа процесса нагревания предположим, что нагрев происходит равномерно по всему объему машины, а рассеивание теплоты происходит равномерно со всей поверхности.

Составим уравнение нагревания, для чего рассмотрим тепловой баланс. Количество теплоты Q, выделяемой в машине за бесконечно малый промежуток времени dt будет Qdt. Эта теплота, как было сказано выше, частично остается в машине и частично отдается в окружающую среду.

Пусть за время dt температура машины массой G повысилась на $d\tau$, тогда количество теплоты, поглощаемой машиной, составит $Gc\,d\tau$, где c — удельная теплоемкость, т.е. количество теплоты, необходимой для нагревания 1 кг вещества на 1 °С.

Если за время dt превышение температуры машины над температурой окружающей среды составило τ, то количество теплоты, отдаваемое в окружающую среду будет $S\lambda\tau\,dt$, где S — площадь тела и λ — коэффициент теплоотдачи с поверхности машины.

В соответствии с законом сохранения энергии составим уравнение теплового баланса:

$$Q\,dt = Gc\,d\tau + S\lambda\tau\,dt. \qquad (1.23)$$

В начальный период времени температуры машины и окружающей среды одинаковы ($\tau \approx 0$). При дальнейшей работе нагрев машины увеличивается, при этом часть теплоты отдается в окружающую среду. И наконец наступает такой момент, когда дальнейшее увеличение температуры нагрева машины прекратится и вся выделенная теплота будет отдаваться в окружающую среду. Это режим теплового равновесия ($Gc\,d\tau = 0$).

$$Q\,dt = S\lambda\tau_у\,dt, \qquad (1.24)$$

$$Q = S\lambda\tau_у, \qquad (1.25)$$

где $\tau_у$ — установившаяся температура перегрева машины.

Подставив значение (1.25) в (1.23), получим:

$$S\lambda\tau_у = Gc\,d\tau + S\lambda\tau\,dt. \qquad (1.26)$$

Решая уравнение (1.26) при нулевых начальных условиях, получим:

$$\tau = \tau_у (1 - e^{-t/T}), \qquad (1.27)$$

где $e = 2{,}718$ — основание натуральных логарифмов;

T — постоянная времени нагревания машины.

Выражение $T = Gc/S$ представляет собой время, в течение которого машина нагревалась бы до наибольшей установившейся температуры, если бы теплота не рассеивалась в окружающую среду.

Графически T определяется отрезком АВ (рис. 1.1). Зависимость $\tau = f(t)$ представляет собой экспоненту (кривая *1*). Экспонента показывает, что машина достигает установившегося значения температуры перегрева лишь по истечении длительного времени. Теоретически тело достигает установившейся температуры по истечении бесконечно большого времени. Практически считают, что тепловой режим становится установившимся по истечении длительного времени, т.е. при $(4—5)T$.

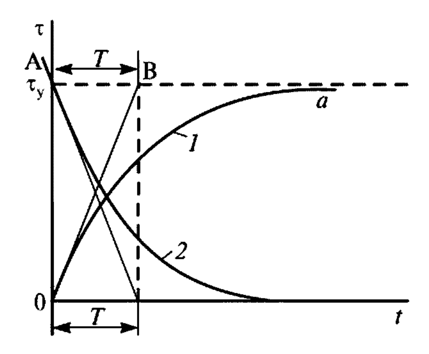


Рис. 1.1. Кривые нагревания (*1*) и охлаждения (*2*) электрических машин

Если отключить машину от сети, то ее нагрев прекратится и уравнение теплового баланса примет вид:

$$0 = Gc\,d\tau + S\lambda\tau\,dt$$

или

$$-Gc\,d\tau = S\lambda\tau\,dt. \qquad (1.28)$$

Решая уравнение (1.28), получим:

$$\tau = \tau_у e^{-t/T}. \qquad (1.29)$$

Из уравнения (1.29) видно, что остывание машины также происходит по экспоненциальному закону (рис. 1.1, кривая *2*).

Процессы нагрева и охлаждения машин протекают сравнительно медленно. Так, постоянные времени нагрева некоторых вспомогательных машин ЭПС лежат в пределах от 0,5 до нескольких часов.

Из-за низкой теплопроводности изоляции обмоток электрических машин возможно некоторое отличие теоретического и действительного изменения процесса нагрева обмоток в начале нагревания.

Нагрев электрических машин существенно влияет на их долговечность. Электрические устройства ЭПС рассчитывают на срок службы от 10 до 30 лет. Срок службы машины определяется состоянием изоляции ее обмоток. Как указывалось в гл. 1, электроизоляционные материалы делят на классы нагревостойкости. В электрических машинах ЭПС применяют изоляцию классов B, F, H, C. Каждому классу соответствует определенная предельно допустимая температура нагрева. Если температура нагрева изоляции не превышает предельно допустимого значения, то машина может работать в течение длительного времени. Установлено, что превышение допустимой температуры изоляции на 8 °C снижает срок ее службы примерно вдвое (правило восьми градусов). Температуру окружающей среды принимают равной +40 °C. При расчетах срока службы за условную температуру окружающей среды принимают +25 °C.

Охлаждение электрических машин. Как указывалось выше, все потери электрической машины в конечном счете превращаются в тепловую энергию. Охлаждение электрической машины может быть естественным или искусственным. Естественное охлаждение в свою очередь подразделяется на охлаждение за счет теплопроводности и охлаждение за счет конвекции.

Теплопроводность — это передача тепла внутри твердого тела от более нагретых слоев менее нагретым. Например, передача тепла от обмоток через пазовую часть сердечнику статора, а от сердечника — корпусу.

Конвекция — это перенос тепла потоками воздуха. Частицы воздуха, омывая нагретые части машины, нагреваются и поднимаются вверх, уступая место менее нагретым частицам. Такое охлаждение применяется или в машинах малой мощности или в машинах очень большой мощности.

Для более интенсивного охлаждения применяют специальные устройства — *вентиляторы*, создающие поток воздуха внутри машины. В зависимости от места установки этих вентиляторов и способа их вращения различают системы независимой вентиляции, самовентиляции и смешанной вентиляции. При независимой вентиляции вентилятор устанавливают вне вентилируемой им машины (чаще всего — в кузове электровоза) и приводят его во вращение приводным электродвигателем.

Вспомогательные электрические машины ЭПС имеют сравнительно небольшую мощность, а также мало изменяющуюся частоту вращения. Охлаждение таких машин осуществляется встроенным вентилятором, т.е. применяется самовентиляция. Вентилятор обычно насаживают на вал ротора.

Самовентиляция также применяется в тяговых электродвигателях электропоездов.

В тяговых электродвигателях электровозов применяют индивидуальную или групповую независимую вентиляцию. При независимой индивидуальной вентиляции один вентилятор охлаждает один тяговый электродвигатель. Так как на электровозах необходимо охлаждать не только тяговые электродвигатели, но и другое оборудование, то обычно вентиляторы охлаждают не один, а несколько тяговых электродвигателей. Например, на электровозах ВЛ10 и ВЛ11 вентилятор охлаждает тяговые электродвигатели одной тележки.

Контрольные вопросы

1. Какие виды потерь существуют в электрической машине?
2. Чем вызываются магнитные потери?
3. Какие виды потерь не зависят от нагрузки?
4. Как происходит охлаждение тяговых электродвигателей электровозов?
5. От каких параметров зависит КПД электрической машины?

Глава 2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Классификация электрических машин постоянного тока

Как указывалось выше, электрические машины постоянного тока могут работать в двух режимах: генератора (рис. 2.1, *а*) и электродвигателя (рис. 2.1, *б*).

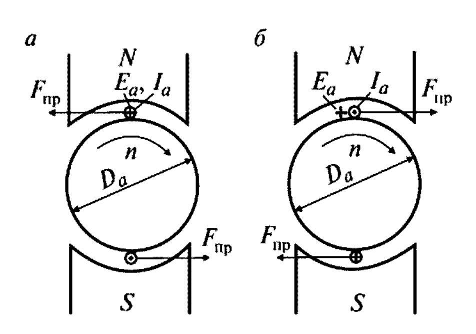


Рис. 2.1. Работа простейшей машины постоянного тока в режиме генератора (*а*) и двигателя (*б*)

Электрические машины постоянного тока тягового подвижного состава (ТПС) можно классифицировать по выполняемым функциям: тяговые генераторы и электродвигатели, двигатели, преобразователи и вспомогательные машины. Некоторые типы преобразователей также относят к вспомогательным машинам.

Тяговые двигатели по роду тока подразделяют на тяговые двигатели постоянного, пульсирующего и переменного тока. Двигатели переменного тока могут быть асинхронными и вентильными.

Преобразователи, применяемые в электровозах и электропоездах, это расщепители фаз: преобразователи, питающие обмотки возбуждения тяговых электродвигателей электровозов постоянного тока в режиме рекуперации, а также преобразователи, преобразующие постоянный ток в трехфазный в электропоездах постоянного тока.

Вспомогательные машины в свою очередь подразделяются на двигатели привода насосов, компрессоров и вентиляторов. Причем функции вспомогательных машин в зависимости от типа электровоза или электропоезда могут выполнять электрические машины постоянного или переменного тока.

К вспомогательным машинам тепловозов относятся возбудители, вспомогательные генераторы, стартер-генераторы, а также двигатели приводов топливо- и маслоподкачивающих насосов, компрессоров, вентиляторов.

Характерным признаком машин постоянного тока является наличие у них коллектора. Коллектор является механическим преобразователем. У генераторов коллектор преобразует переменную ЭДС, индуктируемую в обмотке якоря, в постоянную, а у электродвигателей — изменяет направление тока в проводниках обмотки якоря при переходе их из зоны магнитного полюса одной полярности в зону полюса другой полярности.

2.2. Принцип действия электрических машин постоянного тока

Принцип действия электрических машин основан на явлении электромагнитной индукции.

Простейший генератор переменного тока (рис. 2.2) представляет собой виток *a*, *b*, *c*, *d*, вращающийся в магнитном поле, создаваемом электромагнитами *N* и *S*. Концы витка *a—d* присоединены к двум кольцам *1'* и *2'*, вращающимся с той же частотой, что и виток.

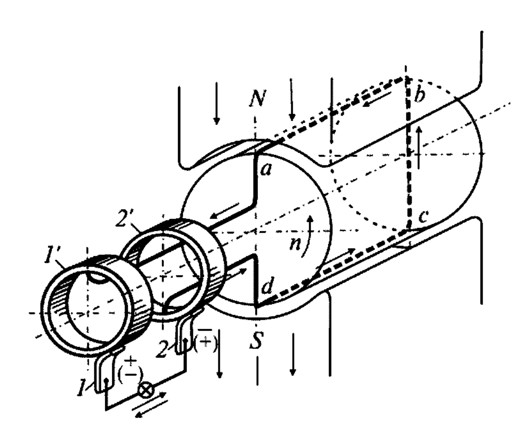


Рис. 2.2. Простейшая машина переменного тока:
1, *2* — щетки; *1'*, *2'* — кольца

На кольца наложены щетки *1* и *2*, к которым присоединена лампочка — нагрузка.

В режиме генератора виток, вращаясь с равномерной скоростью, пересекает магнитные силовые линии, причем, чем ближе к горизонтальной плоскости витка, тем меньшее количество магнитных силовых линий будет пересекаться его сторонами (рис. 2.3). Следовательно, индуктируемая ЭДС будет уменьшаться. В горизонтальной плоскости она будет равна нулю.

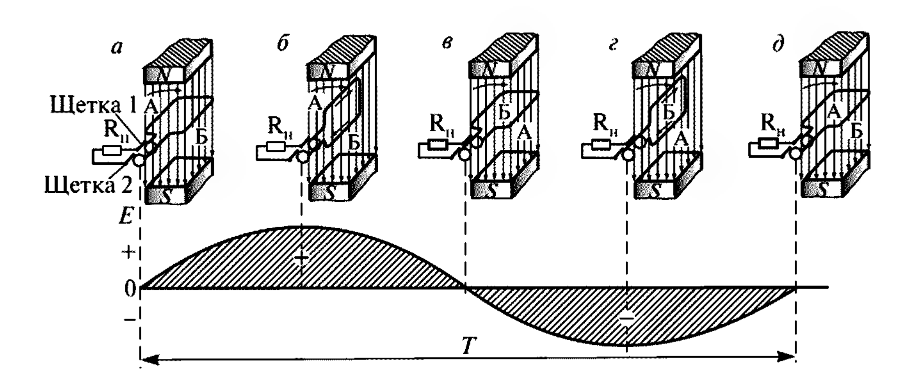


Рис. 2.3. Кривая ЭДС генератора переменного тока:
а, *б*, *в*, *г*, *д* — последовательные положения рамки витка при его вращении

При дальнейшем вращении сторона витка, расположенная под северным полюсом, будет перемещаться под южным полюсом, но в противоположном направлении, чем под северным. Поэтому направление ЭДС изменится на противоположное, как и магнитной индукции *B*. Таким образом, в рассматриваемом витке индуктируется переменная во времени ЭДС, изменяющая свое направление дважды за один его оборот. Величина этой ЭДС, индуктированной в проводнике витка, вращающегося в магнитном поле $E_{пр}$, зависит от магнитной индукции *B*, длины проводника *l* и скорости перемещения проводника в магнитном поле *v*:

$$E_{пр} = Blv. \quad (2.1)$$

По контуру витка (верхняя и нижняя части – проводники – рамки) ЭДС складываются, следовательно, ЭДС витка будет равна

$$E_{пр} = 2\,Blv. \quad (2.2)$$

Направление ЭДС при вращении витка изменяется. И точно также будет изменять свое направление получаемый при этом ток, протекающий по внешней сети. Такой ток называется переменным и характеризуется периодом *T* и частотой *f*, которая определяется по формуле

$$f = 1/T = pn/60, \quad (2.3)$$

где *p* — число пар полюсов;
n — частота вращения, об/мин;
60 — число секунд в минуте.

Часть электрической машины, в обмотках которой индуктируется ЭДС, называется *якорем*. В машинах постоянного тока якорь является ротором. Если кольцо разрезать на два полукольца (рис. 2.4), изолировать их друг от друга и подключить к ним наш виток, то во внешней цепи потечет ток одного направления (рис. 2.5). Получается механический выпрямитель, который называется *коллектором*. Рассмотрим этот процесс.

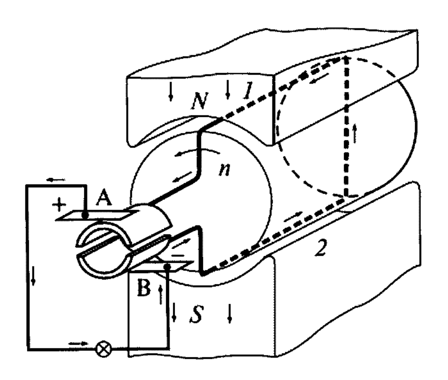


Рис. 2.4. Схема простейшей машины постоянного тока

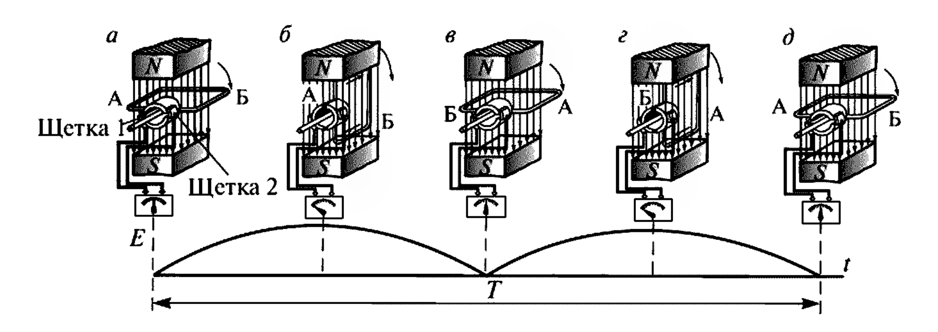


Рис. 2.5. Кривые тока нагрузки генератора постоянного тока

Щетки на коллекторе устанавливают так, чтобы они переходили с одной пластины на другую в тот момент, когда индуктируемая ЭДС в витке равна нулю. В этом случае при вращении витка в нем будет индуктироваться переменная ЭДС, но каждая щетка будет контактировать только с той коллекторной пластиной и соответственно с тем проводником, который находится под определенным полюсом. Так, например, щетка *1* будет всегда соединена с проводником, находящимся под северным полюсом, а щетка *2* — под южным. Так как на вращающей части машины — роторе — находится не один виток, а множество, то витки образуют обмотку ротора, а полукольца — коллекторные пластины. Для сглаживания пульсации выпрямленного тока необходимо увеличить количество коллекторных пластин.

Направление ЭДС определяют по *правилу правой руки* (рис. 2.6, *а*). Для этого правую руку надо расположить так, чтобы магнитные силовые линии были направлены перпендикулярно ладони, а отогнутый на 90° большой палец был направлен по вектору скорости, тогда четыре вытянутых пальца покажут направление ЭДС.

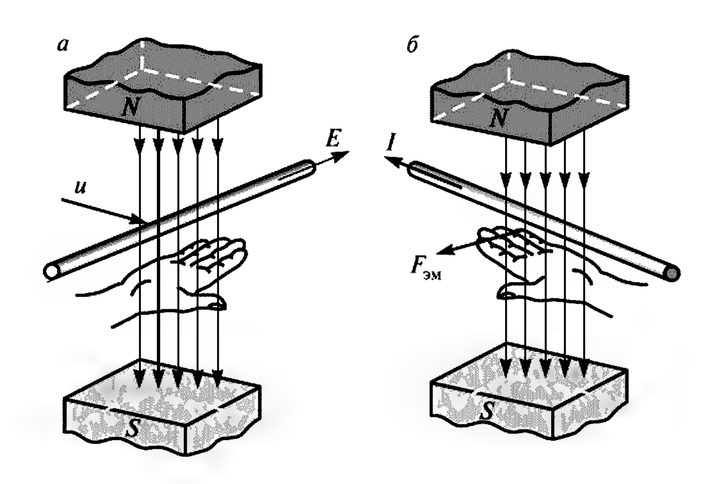


Рис. 2.6. Правила правой (*а*) и левой (*б*) руки

В *режиме двигателя* к обмотке якоря (в нашем случае — к витку) подводят постоянный ток от внешнего источника. При этом образуется магнитное поле якоря (витка), которое взаимодействует с магнитным полем полюсов, создавая электромагнитные силы $F_{пр}$ (см. рис. 2.1,*б*):

$$F_{пр} = BlI_a. \tag{2.4}$$

Эта пара сил образуют (с диаметром якоря D_a) момент $M_{эм}$, который равен

$$M_{эм} = F_{пр} D_a = BlI_a D_a. \tag{2.5}$$

Якорь (виток) начинает вращаться. Так как проводники якоря (витка) вращаются в магнитном поле, то в них также будет индуктироваться ЭДС. Направление этой ЭДС в двигателе такое же как и в генераторе. Следовательно, в двигателе ЭДС якоря направлена против тока I_a. Поэтому ЭДС якоря двигателя называется также противо-ЭДС.

Направление электромагнитной силы $F_{эм}$ определяется по *правилу левой руки*, а именно: ладонь левой руки располагают в магнитном поле так, чтобы линии поля были направлены в ладонь, а четыре пальца руки, вытянутые в плоскости ладони, располагаются в направлении тока; тогда большой палец отогнутый в плоскости ладони на 90°, покажет направление электромагнитной силы (рис. 2.6, *б*).

2.3. Устройство электрических машин постоянного тока

Как указывалось выше, машина постоянного тока состоит из двух основных частей: неподвижной — статора — и вращающейся — ротора, который является якорем. Неподвижная и вращающаяся части отделены друг от друга воздушным зазором (рис. 2.7).

Статор состоит из станины *6*, главных полюсов *4* с обмотками возбуждения *5*, переднего *13* и заднего *7* подшипниковых щитов, щеткодержателей *15* со щетками *2*. Станина опирается на фундамент посредством лап *12*.

Якорь состоит из вала *10*, сердечника якоря *3* с обмоткой *9*, лобовые части которой закреплены бандажами *11*, и коллектора *1*. Сердечник якоря выполнен из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, изолированных друг от друга лаком.

Станина с главными полюсами образуют магнитную систему машины, которую называют *индуктором*. Станину изготовляют из ферромагнитного материала (обычно стали), обладающего высокой прочностью и магнитной проницаемостью. В машинах малой и средней мощности ее выполняют из стальной трубы, а в машинах большой мощности применяют стальное литье, например в тяговых электродвигателях локомотивов. Также используют сварные станины из толстолистовой стали (тяговый генератор тепловоза).

Вентилятор *8* предназначен для охлаждения машины. Его напрессовывают на вал якоря.

С торцов машина закрыта подшипниковыми щитами — передним *13* и, с противоположной стороны, задним *7*. На переднем подшипниковом щите с обеих сторон расположены крышки (на рис. 2.7 изображена их нижняя часть), предназначенные для осмотра и ремонта коллекторно-щеточного узла.

Главные полюса статора с обмотками возбуждения предназначены для создания основного магнитного потока. Они состоят из

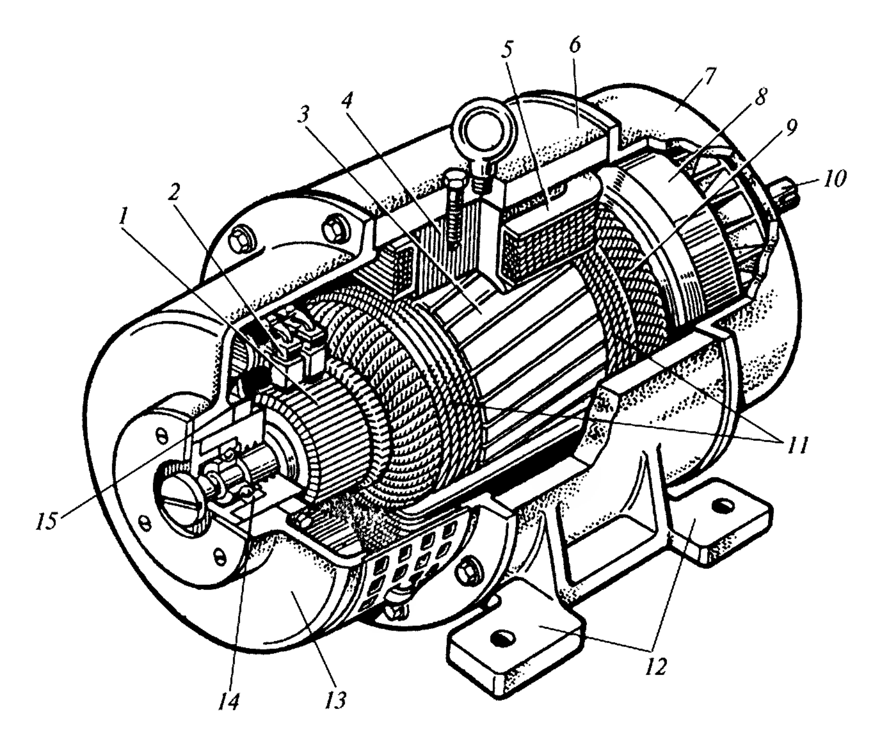


Рис. 2.7. Электрическая машина постоянного тока:
1 — коллектор; *2* — щетки; *3* — сердечник якоря; *4* — главный полюс; *5* — обмотка возбуждения главного полюса; *6* — станина; *7*, *13* — задний и передний подшипниковые щиты; *8* — вентилятор; *9* — обмотка якоря; *10* — вал; *11* — бандаж; *12* — лапы; *14* — подшипник; *15* — щеткодержатель

сердечника *1* (рис. 2.8), изготовленного из отдельных листов электротехнической стали, скрепленных заклепками или шпильками, и катушки возбуждения *2*. Сердечник прикреплен к станине *3* болтом *4*.

Между главными полюсами в машинах мощностью более 0,5 кВт устанавливают добавочные полюса, улучшающие условия токосъема. Добавочные полюса, как и главные, крепят к станине болтами.

Изменяя ток, протекающий по обмотке возбуждения, можно регулировать величину основного магнитного потока.

Сердечник якоря выполняют из отдельных листов электротехнической стали, изготовленных в виде дисков (рис. 2.9, *а*). Диски насаживают либо непосредственно на вал, либо набирают на якорную

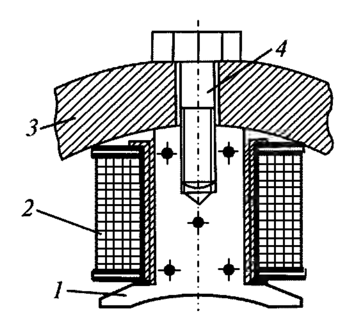


Рис. 2.8. Конструкция главного полюса

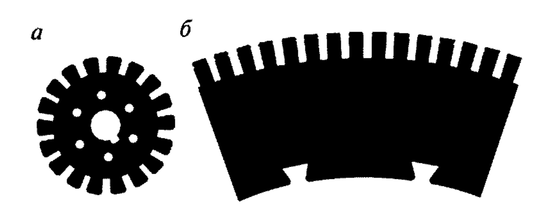


Рис. 2.9. Диск (*а*) и сегмент (*б*) сердечника якоря

втулку, которую напрессовывают на вал. Сердечник якоря большого диаметра составляют из штампованных сегментов (рис. 2.9, *б*).

Обмотку укладывают в пазы якоря. Ее обычно выполняют медным проводом круглого или прямоугольного сечения. Пазы якоря после заполнения их проводами закрывают клиньями, выполненными из дерева или текстолита. Лобовые части обмотки якоря крепят бандажом *11* (см. рис. 2.7). Бандаж может быть проволочным (некоторые вспомогательные машины), но в тяговых машинах его чаще всего выполняют из стеклоленты.

Обмотку якоря присоединяют к коллектору *1* (см. рис. 2.7), который в зависимости от мощности, быстроходности и других параметров имеет различное исполнение.

Может возникнуть вопрос: почему же в машине постоянного тока якорь и главные полюсы делают шихтованными? Ведь из курса электротехники известно, что вихревые токи возникают лишь в случае, если магнитный поток будет либо переменным, либо пульсирующим. Рассмотрим участок электрической машины, включающий воздушный зазор и части главного полюса и якоря (рис. 2.10). При вращении якоря магнитная силовая линия попадает то в его паз, то в зубец. Из курса электротехники известно, что магнитная проницаемость возду-

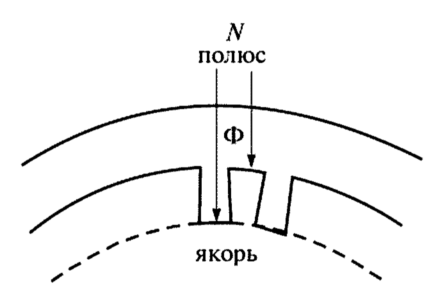


Рис. 2.10. Изменения длины магнитной силовой линии в пазу якоря

ха примерно в 1000 раз меньше магнитной проницаемости стали. Поэтому происходит изменение магнитного сопротивления, а это приводит к пульсации магнитного потока Ф, что, в свою очередь, вызывает появление вихревых токов, которые нагревают машину, что повреждает ее изоляцию и снижает КПД. Поэтому сердечники якоря и главных полюсов делают шихтованными, т.е. из отдельных изолированных пластин электротехнической стали.

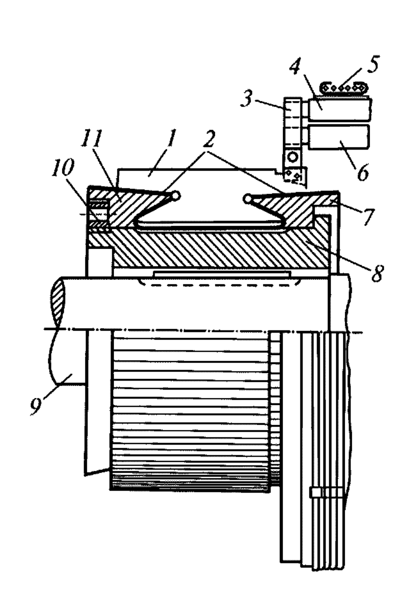


Рис. 2.11. Устройство коллектора

Устройство коллектора показано на рис. 2.11. Пластины *1* коллектора изготовляют из твердотянутой меди толщиной 3—15 мм, изолированные друг от друга миканитовыми прокладками *2*, нижняя часть коллекторных пластин имеет форму «ласточкина хвоста». Стальные конусы *7*, *11* с клиновидными выступами через миканитовые манжеты зажимают нижнюю часть коллекторных пластин посредством гайки *10*. Коллектор смонтирован на втулке *8*, которая напрессована на вал *9*. К выступающей части *3* коллектора, называемой «петушком», припаяны выводы *4* и *6* обмотки якоря, лобовые части которых закреплены бандажом *5*. Коллекторы некоторых электрических машин снабжены неразборным коллектором, исполненном «на пластмассе» (рис. 2.12). Пластины такого коллектора при сборке вдавливают в разогретую пластмассу. После застывания пластмассы создается монолитное соединение пластмассового корпуса *2* и пластин *1* (см. рис. 2.12).

Для токосъема применяют щеточные аппараты — *щеткодержатели* (рис. 2.13). Щеткодержатель укрепляют на щеточных пальцах посредством зажимов *4*. На одном пальце может быть несколько щеткодержателей. *Щетку 1* помещают в обойму *2*. На щетку давит нажимная планка *6* посредством цилиндрической или спиральной пружины *3*. Щетка снабжена медным шунтом *5*. Если бы шунт отсутствовал, то подвод тока осуществлялся бы через пружину, что вы-

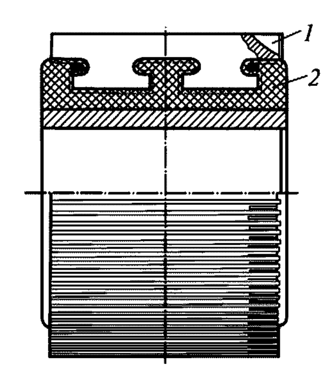


Рис. 2.12. Коллектор с пластмассовым корпусом

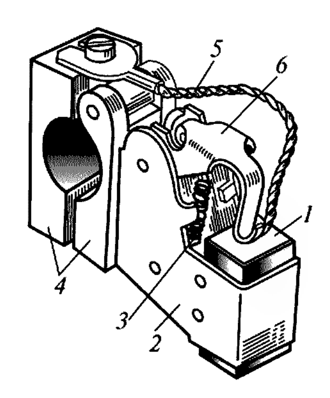


Рис. 2.13. Конструкция щеткодержателя

зывало бы ее нагрев и потерю упругих свойств. Давление на щетку можно регулировать специальным винтом. Щеткодержатели крепят или к корпусу машины, или к специальной траверсе, которую можно поворачивать, что очень удобно для осмотра и замены изношенных щеток.

Обмотки якорей. Основным элементом обмотки является *секция*, которая может иметь один, два и более витков. На рис. 2.14 изображены одновитковые секции обмотки якоря: секция простой волновой обмотки (рис. 2.14, *а*); секция простой петлевой обмотки (рис. 2.14, *б*) и разрезная секция (рис. 2.14, *в*). Каждая секция состоит из следующих элементов: активных сторон *2* и *5*, которые уложены в пазы якоря; лобовых частей *1* и *3*, предназначенных для

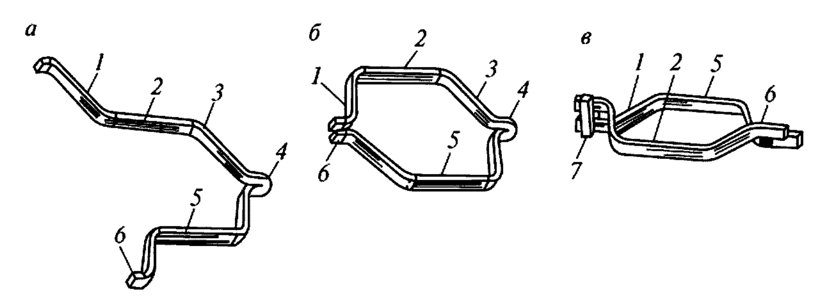


Рис. 2.14. Секции обмотки якоря:
а — простой волновой обмотки, *б* — простой петлевой обмотки, *в* — разрезная секция

соединения активных сторон в замкнутую цепь; головки *4*. Концы секции *6* припаивают к «петушкам» коллектора. Разрезная секция соединена скобой *7*.

Ширину секций выбирают таким образом, чтобы стороны секций располагались под полюсами разной полярности. Тогда ЭДС, индуктированная в сторонах секций, будет суммироваться. Это возможно только в том случае, если ширина секции равна полюсному делению.

Полюсным делением τ называют часть окружности якоря, приходящуюся на один полюс:

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}, \qquad (2.6)$$

где D_a — диаметр якоря;
p — число пар полюсов.

Обмотки якоря обычно выполняют двухслойными. Одну сторону секции располагают в верхней части паза, а другую — в нижней. Благодаря этому индуктивность всех секций будет одинаковой. Верхняя пазовая сторона одной секции и нижняя пазовая сторона другой секции, лежащие в одном пазу, образуют *элементарный паз*. В одном реальном пазу может быть несколько элементарных пазов u_n (рис. 2.15, *а, б, в*). На схемах обмоток стороны секций, находящиеся в верхнем слое, изображают сплошными линиями, а стороны, расположенные в нижнем слое, — штриховыми линиями. Общее число коллекторных пластин K равно числу секций S и числу элементарных пазов $Z_э$:

$$K = S = Z_э. \qquad (2.7)$$

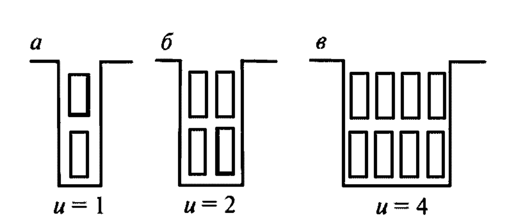


Рис. 2.15. Примеры заполнения реальных пазов якоря при $u = 1$ (*а*), $u = 2$ (*б*), $u = 4$ (*в*)

Обмотки якорей подразделяют на следующие виды: простая петлевая, простая волновая, сложная петлевая, сложная волновая и комбинированная.

Простую петлевую обмотку применяют в тяговых машинах при токах свыше 300—350 А.

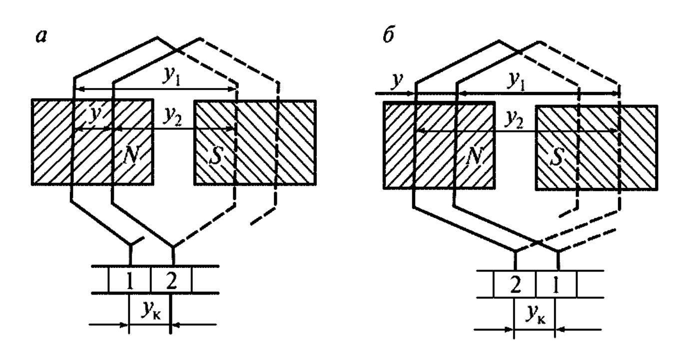


Рис. 2.16. Шаги обмотки якоря

Каждая секция в простой петлевой обмотке присоединена к двум рядом расположенным коллекторным пластинам. На рис. 2.16 представлены варианты укладки секций простой петлевой обмотки. Если укладка секций ведется слева направо по якорю, то обмотка называется правоходовой (рис. 2.16, *а*), если же укладка секций ведется справа налево — левоходовой (рис. 2.16, *б*).

Обмотка характеризуется определенными параметрами:

– первый частичный шаг y_1 — расстояние между начальной и конечной сторонами одной секции;

– второй частичный шаг y_2 — расстояние между конечной стороной первой секции и начальной стороной второй секции;

– результирующий шаг y — расстояние между начальными сторонами двух секций.

– шаг по коллектору $y_К$ — расстояние между соседними коллекторными пластинами, к которым присоединены стороны одной секции.

Для простой петлевой обмотки их рассчитывают по формулам:

$$y_1 = (Z_э/2p) \pm \varepsilon, \tag{2.8}$$

$$y = 1, \tag{2.9}$$

$$y_2 = y_1 - y = y_1 - 1, \tag{2.10}$$

где ε — некоторая величина, меньшая единицы, вычитая или суммируя которую получают значения шага y_1, равное целому числу.

Шаги по якорю выражают в элементарных пазах.

В качестве примера построим развернутую схему простой петлевой обмотки якоря для четырехполюсной машины ($2p = 4$) постоянного тока. Обмотка содержит 16 секций.

Исходные данные: $Z_э = 16$; $2p = 4$.

Определим первый частичный шаг: $y_1 = 16/4 = 4$ паза.

Второй частичный шаг: $y_2 = 4 - 1 = 3$ паза.

$$\varepsilon = 0;\ y = 1.$$

Вначале на лист бумаги наносим и нумеруем пазы со сторонами секций, причем стороны секций, расположенные в верхней части паза изображаем сплошными линиями, а в нижней — штриховыми. После этого наносим контуры полюсов (рис. 2.17). При этом нужно иметь в виду, что изображаем не сам полюс, а его проекцию. Ниже строим коллекторные пластины и тоже нумеруем. Номер коллекторной пластине присваиваем тот же, что и стороне, лежащей в верхней части паза. Затем наносим контур первой секции. Начало секции присоединяем к первой коллекторной пластине, а конец — ко второй. Ее ширина равна первому частичному шагу (y_1), т.е. четырем. Далее наносим контур второй секции и т.д. Последняя секция 16 замыкает обмотку.

На рис. 2.17 показана развернутая схема простой петлевой обмотки якоря.

Направление ЭДС, наводимой в проводниках при вращении якоря в магнитном поле главных полюсов, определяется правилом

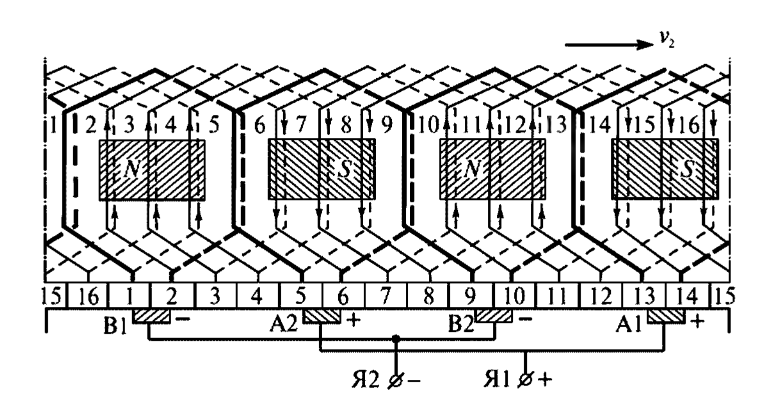


Рис. 2.17. Схема простой петлевой обмотки

правой руки. При вращении якоря по часовой стрелке направление ЭДС в проводниках показано на рис. 2.17 стрелками.

При обходе обмотки по схеме можно установить, что для рассматриваемого положения якоря коллекторные пластины *1*, *5*, *9*, *13* являются узловыми точками, с которыми соединены секции, имеющие *встречное направление* ЭДС. На этих коллекторных пластинах устанавливаем щетки, которые делят обмотку якоря на параллельные ветви. Эти же коллекторные пластины делят всю обмотку на участки с одинаковым направлением ЭДС в секциях. Щетки *5* и *13* (рис. 2.18), с которых ток поступает во внешнюю сеть, считаются положительными, а щетки *1* и *9* — отрицательными. Щетки одинаковой полярности соединяют между собой параллельно и выводят на зажимы машины.

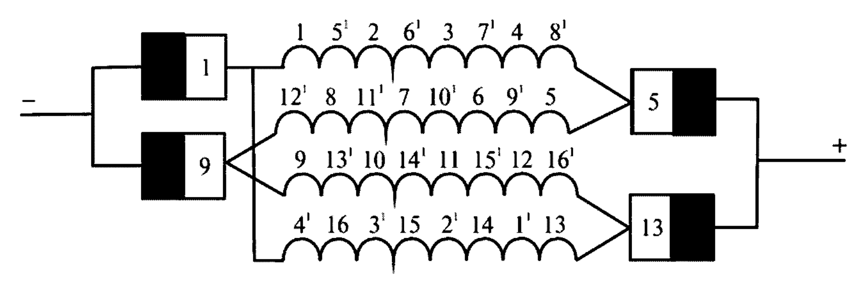


Рис. 2.18. Параллельные ветви простой петлевой обмотки

Общее количество параллельных ветвей $2a$ простой петлевой обмотки равно

$$2a = 2p. \qquad (2.11)$$

Простую волновую обмотку выполняют на вспомогательных машинах постоянного тока ТПС. Ее получают при последовательном соединении секций, находящихся под разными полюсами. Последовательно обходя секции, совершаем волнообразный обход по якорю и заканчиваем его слева или справа от исходной. В первом случае получаем неперекрещенную обмотку (рис. 2.19, *а*), а во втором случае (рис. 2.19, *б*) — перекрещенную. Второй вид обмотки не рассматриваем, так как требуется большой расход обмоточного провода. За один обход по якорю последовательно соединяем столько секций, сколько пар полюсов имеет машина. Затем дела-

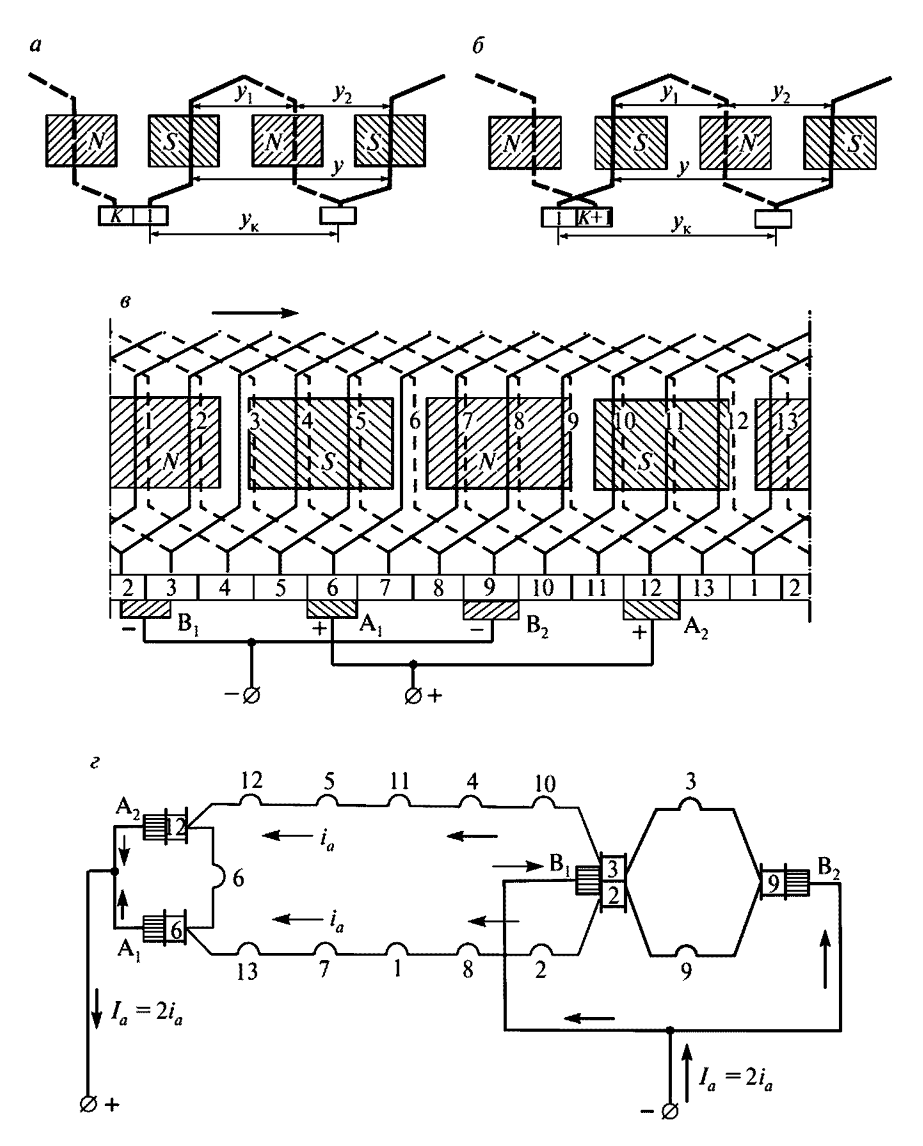


Рис. 2.19. Простая волновая обмотка:
а — секции неперекрещенной обмотки; *б* — секции перекрещенной обмотки; *в* — развернутая схема обмотки; *г* — параллельные ветви обмотки

ем второй, третий и все последующие обходы, пока не будут все секции обмотки соединены между собой. Все шаги обмотки определяем по формулам:

$$y_1 = (Z_э/2p) \pm \varepsilon; \quad (2.12)$$

$$y = (K \pm 1)/p; \quad (2.13)$$

$$y_2 = y - y_1. \quad (2.14)$$

Рассмотрим построение простой волновой обмотки по данным: $Z_э = 13$; $2p = 4$.

$y_1 = 13/4 = 3{,}25$; $\varepsilon = 0{,}25$; $y_1 = 3$; $y = (13 - 1)/2 = 6$; $y_2 = 6 - 3 = 3$.

При первом обходе по якорю укладываем секции *1* и *7* (рис. 2.19, *в*). При втором обходе — *13* и *6* и т.д., пока не будут уложены все секции и обмотка якоря не будет замкнутой. Затем определяем их полярность и устанавливаем щетки. Строим параллельные ветви (рис. 2.19, *г*) Общее количество параллельных ветвей простой волновой обмотки:

$$2a = 2, \quad (2.15)$$

независимо от количества полюсов машины.

Сложная петлевая обмотка состоит из двух и более простых петлевых обмоток, уложенных в пазы якоря.

Сложная волновая обмотка также состоит из двух и более простых волновых обмоток, уложенных в пазы якоря.

Комбинированная обмотка состоит из простой петлевой и простой волновой обмоток.

Условия симметрии обмоток. Обмотка якоря будет симметричной, если ЭДС ее параллельных ветвей при любом положении якоря будут равны и если параллельные ветви обладают одинаковым сопротивлением. В противном случае по обмотке якоря появится ток при холостом ходе. Этот уравнительный ток нагревает обмотку якоря и увеличивает плотность тока под щетками, вызывая повышенное искрение при токосъеме. Для устранения возможности появления уравнительных токов необходимо соблюдать определенные условия симметрии обмотки якоря. Они состоят в следующем:

– число проводников во всех пазах должно быть одинаковым, т.е. $S = N/Z$ — целое число;

– каждая пара параллельных ветвей должна содержать одинаковое число пазов Z/a — целое число;

– каждая пара параллельных ветвей должна содержать одинаковое число секций, т.е. S/a — целое число;

– каждой стороне секций, принадлежащей одной паре параллельных ветвей, должны соответствовать секционные стороны других пар параллельных ветвей; иначе говоря, каждая пара параллельных ветвей обмотки должна занимать одинаковое положение от системы главных полюсов, т.е. $2p/a$ — целое число.

Условные обозначения обмоток. Российскими стандартами установлены обозначения обмоток машин постоянного тока (рис. 2.20). Начало и конец обмоток обозначают следующим образом: якоря Я1—Я2; независимой обмотки возбуждения Н1—Н2; параллельной обмотки возбуждения Ш1—Ш2; последовательной обмотки возбуждения С1—С2; компенсационной обмотки К1—К2; обмотки возбуждения добавочных полюсов Д1—Д2.

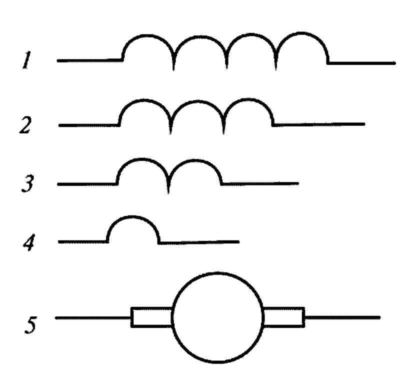


Рис. 2.20. Условные стандартные обозначения обмоток машины постоянного тока:
1 — обмотка возбуждения главных полюсов, включенная независимо от обмотки якоря (выводы обозначаются Н1—Н2) или параллельно обмотке якоря (выводы Ш1—Ш2); *2* — обмотка возбуждения главных полюсов, включенная последовательно с обмоткой якоря (выводы С1—С2); *3* — компенсационная обмотка (выводы К1—К2); *4* — обмотка возбуждения добавочных полюсов (выводы Д1—Д2); *5* — обмотка якоря (выводы Я1—Я2 или Я—ЯЯ)

Уравнительные соединения. При соблюдении условий симметрии обмоток якоря ЭДС в параллельных ветвях должны быть одинаковы. Однако нарушение магнитной симметрии машины вследствие различия проводимости для путей магнитного потока приводит к неравенству ЭДС и наличию уравнительного тока.

На рис. 2.21 показана схема машины постоянного тока с четырьмя полюсами *2*. Здесь для упрощения коллектор не изображен, щетки установлены на проводники, выводы которых подключены к коллекторным пластинам, где установлены щетки.

Уравнительный ток, протекая через щеточный аппарат, перегружает щетки, вызывая повышенное искрение. Для устранения этого

нежелательного явления создают дополнительные пути *1* для уравнительных токов, минуя коллекторно-щеточный узел. Для этого соединяют точки одинакового потенциала обмотки якоря проводниками с малым сопротивлением. К этим точкам относятся концы секций, присоединяемые к коллекторным пластинам, или лобовые части обмотки со стороны противоположной коллектору. Число точек равного потенциала, которое можно найти в симметричной обмотке $a = p$. Такие соединения называют *уравнительными соединениями первого рода,* или уравнителями первого рода, или просто уравнителями. Уравнители выполняют либо на стороне коллектора (тяговые электродвигатели НБ-418К6, ТЛ2К и др.), либо на противоположной от коллектора стороне. Шаг уравнителей $y_{ур}$ равен потенциальному шагу обмотки $y_п$:

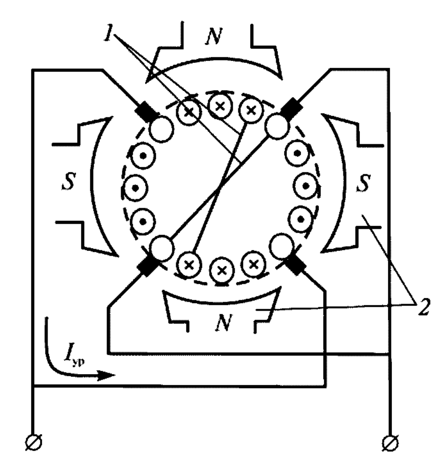


Рис. 2.21. Уравнительные соединения 1-го рода

$$y_{ур} = K/p. \tag{2.16}$$

Электродвижущая сила генератора. Формулу (2.1) путем несложных математических действий можно преобразовать в формулу ЭДС $E_я$ генератора постоянного тока:

$$E_а = (pN/60a)\,\Phi\, n, \text{ В} \tag{2.17}$$

$$\text{или } E_а = C_е\,\Phi\, n, \tag{2.18}$$

где $C_е = pN/60a$ — конструктивная постоянная ЭДС машины;
p — число пар полюсов;
a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря;
N — число активных проводников обмотки якоря;
Φ — магнитный поток, Вб;
n — частота вращения якоря, об/мин.

Как следует из выражения (2.17) и (2.18), ЭДС $E_а$ пропорциональна основному магнитному потоку и частоте вращения якоря.

Напряжение $U_а$ на зажимах генератора меньше ЭДС $E_а$ на значение падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря $r_а$:

$$U_а = E_а - I_а r_а. \qquad (2.19)$$

Электромагнитный момент. При нагрузке машины по проводникам якоря протекает ток. При взаимодействии этого тока с магнитным полем полюсов возникает сила f, величину которой определяют по формуле

$$f = Bli, \text{ Н}, \qquad (2.20)$$

где B — магнитная индукция, Тл;

l — активная длина проводника секции якоря, м;

i — ток, протекающий по секции якоря, А.

Также путем несложных математических преобразований из формулы (2.18) получим формулу электромагнитного момента M:

$$M = pN/(2a\pi)\Phi I_а \qquad (2.21)$$

$$\text{или } M = C_м \Phi I_а, \qquad (2.22)$$

где p — число пар полюсов;

N — число активных проводников обмотки якоря;

Φ — магнитный поток, Вб;

a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря;

$I_а$ — ток, протекающий по обмотке якоря, А;

$C_м = pN/(2a\pi)$ — конструктивная постоянная момента.

В системе СИ значения $C_е$ и $C_м$ одинаковы. Поэтому ЭДС равна

$$E_а = (pN/2\pi a)\Phi\omega, \text{ В}. \qquad (2.23)$$

Из соотношений (2.16) и (2.20) вытекают два равноценных выражения для электромагнитной мощности:

$$P_{эм} = E_а I_а = M_{эм}\omega = (M_{эм} n)/9{,}55. \qquad (2.24)$$

Противо-ЭДС. При вращении якоря электродвигателя проводники его обмотки пересекают магнитные линии главных полюсов, вследствие этого в них индуктируется ЭДС $E_а$, определяемая равенствами (2.17 и 2.18). Электродвижущая сила якоря $E_а$ направлена против тока $I_я$. Поэтому эту ЭДС называют *противо-ЭДС.*

Напряжение, приложенное к якорю электродвигателя, уравновешивается ЭДС $E_а$ и падением напряжения в обмотке якоря:

$$U_а = E_а + I_а r_а. \qquad (2.25)$$

Сопротивление тяговых двигателей ТПС очень мало (около 0,04 Ом) и, следовательно, напряжение $U_а$ практически уравновешивается противо-ЭДС $E_а$.

Ток I_a, протекающий по обмотке якоря, равен

$$I_a = \frac{U_a - C_e n\Phi}{r_a}. \tag{2.26}$$

Если в формулу (2.26) подставить значение E_a из (2.18), то получим зависимость, определяющую регулирование частоты вращения якоря электродвигателя:

$$n = \frac{U_a - I_a r_a}{C_e \Phi}. \tag{2.27}$$

Изложенное выше показывает, что машина постоянного тока может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Таким свойством обладают все вращающиеся электрические машины и называется это свойство *обратимостью.*

Магнитная цепь машины. Главные полюсы с обмотками возбуждения создают магнитодвижущую силу (МДС). МДС, в свою очередь, создает магнитное поле, магнитные линии которого замыкаются через участки машины, образующие ее магнитную систему. Рассмотрим магнитное поле машины при отсутствии нагрузки, т.е. при холостом ходе.

На поперечном разрезе машины (рис. 2.22) показан путь магнитного потока, из которого видно, что весь магнитный поток делится на две неравные части. При этом бо́льшая часть — основной маг-

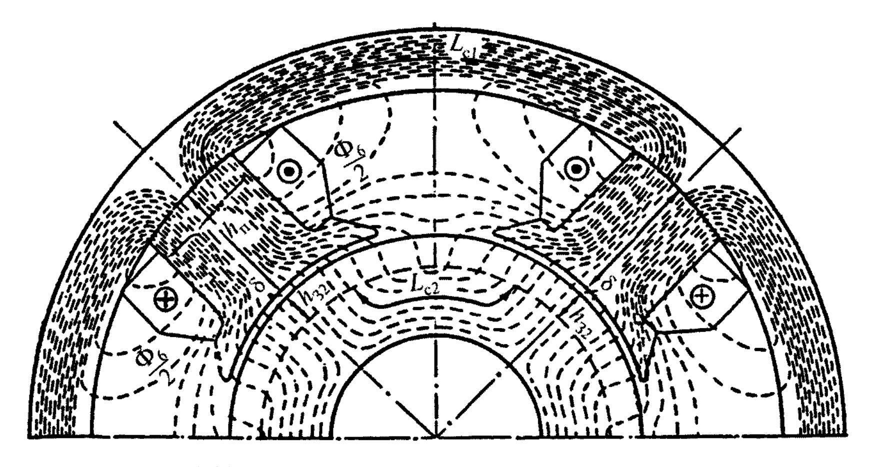


Рис. 2.22. Магнитная цепь машины постоянного тока

нитный поток Ф пронизывает через воздушный зазор якорь, разветвляется в его сердечнике, подходит к соседним полюсам и замыкается через станину. Основным магнитным потоком Ф называют поток в воздушном зазоре δ, приходящийся на один полюс.

Меньшая часть — поток рассеяния $Ф_σ$ — замыкается между полюсами, минуя якорь. Тогда магнитный поток полюса:

$$Ф_п = Ф + Ф_σ = (1 + Ф/Ф_σ)\,Ф = KФ,$$

где $K = 1 + Ф/Ф_σ$ — коэффициент рассеивания главных полюсов. Для машин постоянного тока $K = 1{,}12 - 1{,}25$.

Магнитная цепь машины состоит из отдельных участков: $h_п$ — длина сердечников полюсов; δ — величина воздушного зазора между полюсом и якорем; $h_{з2}$ — длина зубцового слоя якоря; $L_{с2}$ — длина спинки якоря; $L_{с1}$ — длина участка станины. Каждый из участков обладает разным магнитным сопротивлением, так как устройства отличаются как по физическим свойствам, так и по размерам. Расчет магнитной цепи электрической машины состоит в определении магнитных напряжений для всех участков (порядок расчета магнитной цепи выходит за рамки настоящего учебного пособия). Все участки магнитной цепи изготовляют из ферромагнитных материалов:

— сердечник якоря — из тонколистовой электротехнической стали марок 2012, 2014 и 2411 толщиной 0,5 мм;

— сердечник главных полюсов — из листовой анизотропной (холоднокатаной) стали марки 3411 толщиной 1 мм;

— станина — из конструкционной стали Ст3, причем для тяговых электродвигателей используют стальное литье (в некоторых случаях изготавливают сварными из листовой стали), а в машинах малой мощности — из стальных цельнотянутых труб.

При заданном значении ЭДС машины $E_а$ определяют значение Ф:

$$Ф = (60\,a\,E_а)/p\,N n. \qquad (2.28)$$

Магнитная характеристика машины имеет вид, показанный на рис. 2.23. В начале характеристики $Ф = f(F)$ наблюдается линейная зависимость между Ф и F (линия 0—c), а затем наступает магнитное насыщение магнитной цепи машины и линейная зависимость нарушается (участок c—d). Участок между точками c и d называют коленом кривой намагничивания. Для уменьшения габаритов тя-

говых электрических машин их магнитную цепь делают насыщенной, т.е. рабочая точка машины располагается между точками *d* и А.

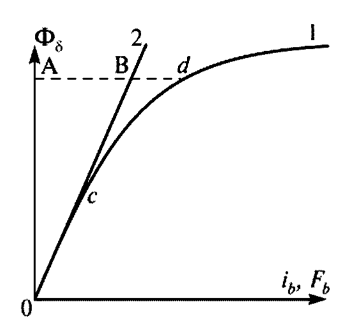


Рис. 2.23. Магнитная характеристика $\Phi = f(F)$

Реакция якоря. При отсутствии тока якоря магнитный поток главных полюсов (рис. 2.24, *а*) симметричен относительно оси главных полюсов, геометрической нейтрали *n—n'* (прямой, проходящей через центр окружности якоря и посередине между двумя соседними полюсами) и равномерно пересекает проводники обмотки якоря, индуктируя в них ЭДС. Как будет указано ниже, щетки в тяговых электродвигателях устанавливают только на геометрической нейтрали. В межполюсном пространстве магнитная индукция снижается до нуля. Распределение магнитной индукции B_δ в воздушном зазоре имеет вид трапецеидальных кривых.

При отключенном токе возбуждения магнитный поток главных полюсов отсутствует. При пропуске по обмотке якоря номинального тока машины будет создаваться свой магнитный поток (рис. 2.24, *б*) с полюсами N_a и S_a, которые повернуты на угол 90° относительно оси главных полюсов, т.е. расположены поперек оси главных полюсов. Наибольшее значение магнитной индукции якоря (кривая *1*) — на линии щеток — на геометрической нейтрали, а по оси полюсов магнитная индукция равна нулю. В межполюсном пространстве магнитная индукция резко ослабевает (см. рис. 2.24, *б*, кривая *2*), что объясняется увеличением магнитного сопротивления межполюсного пространства.

При нагрузке на обмотке якоря и обмотке возбуждения протекают токи, образующие магнитный поток главных полюсов и магнитный поток якоря (рис. 2.24, *в*), которые взаимодействуют между собой. Это воздействие магнитного потока якоря на магнитный поток главных полюсов называется *реакцией якоря.*

Реакция якоря искажает магнитное поле машины, делает его несимметричным относительно оси полюсов. При этом результирующий магнитный поток как бы поворачивается относительно оси главных полюсов на некоторый угол, а физическая нейтраль *m—m'* (прямая, проходящая через центр окружности якоря и через точки

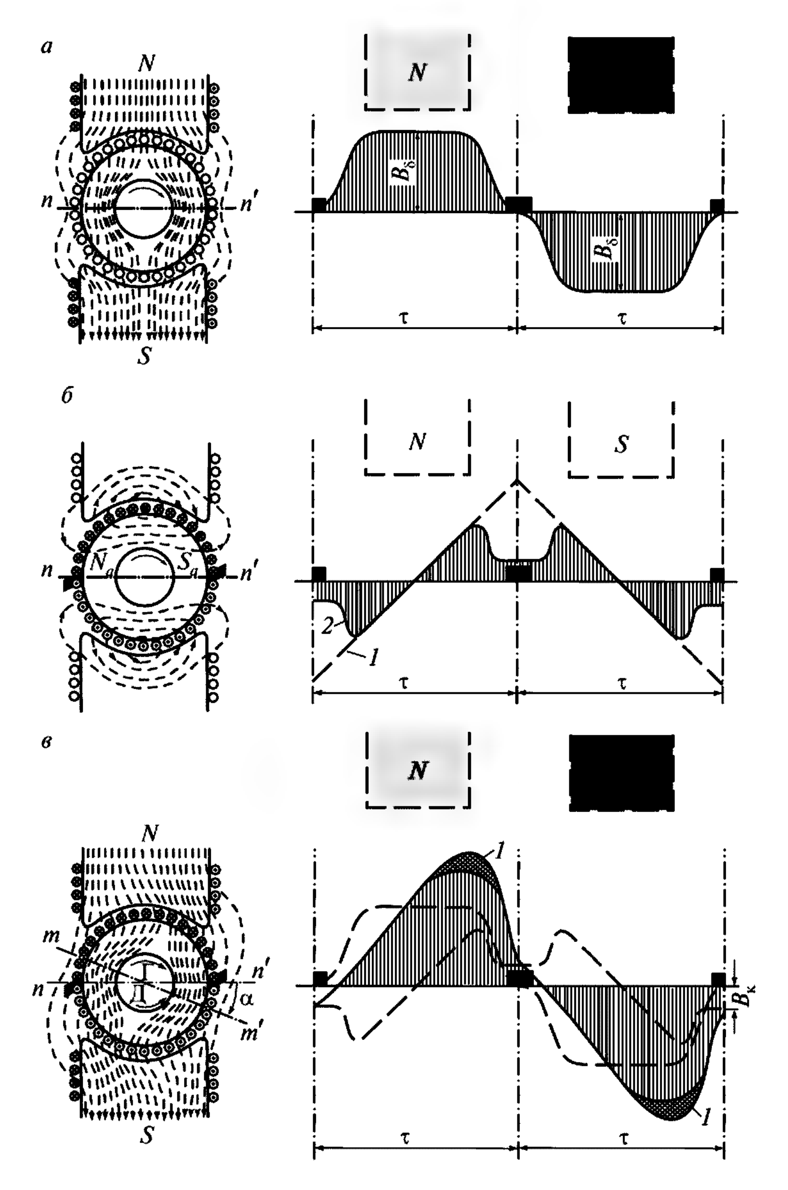


Рис. 2.24. Магнитное поле машины и распределение магнитной индукции в воздушном зазоре:
а, *в* — магнитное поле машины в режиме холостого хода и при нагрузке;
б — магнитное поле якоря

на якоре, где индукция равна нулю) смещается относительно геометрической нейтрали $n—n'$ на угол α. Чем больше нагрузка машины, тем сильнее искажение магнитного поля.

Реакция якоря оказывает негативное влияние на работу машины. Во-первых, сдвиг физической нейтрали относительно геометрической приводит к более тяжелым условиям работы коллекторно-щеточного узла, вызывая повышенное искрение. Во-вторых, искажение магнитного поля по окружности якоря, пропорциональное индуктируемой ЭДС в обмотках якоря, вызывает увеличение напряжения $U_к$ между соседними коллекторными пластинами, особенно в местах, где бóльшая плотность магнитных силовых линий, что может привести к круговому огню по коллектору. При значительных нагрузках машины $U_к$ может превысить допустимые пределы и миканитовая прокладка между смежными пластинами будет перекрыта электрической дугой. Имеющиеся на коллекторе частицы щеточного графита будут способствовать развитию электрической дуги, что приведет к возникновению мощной электрической дуги, перекрывающей весь коллектор или значительную его часть, — явления чрезвычайно опасного.

Кроме того, тяговые машины, как указывалось выше, для уменьшения габаритов выполняют магнитонасыщенными. Реакция якоря в этих машинах уменьшает результирующий магнитный поток, что приводит к уменьшению момента и увеличению частоты вращения тяговых электродвигателей.

Причины искрения на коллекторе. При работе электрической машины в щеточном контакте на коллекторе может появиться искрение. Сильное искрение вызывает порчу коллектора и сокращает срок службы машины. Причины, вызывающие искрение на коллекторе, можно разделить на три группы — механические, потенциальные и электромагнитные.

К *механическим причинам* относят: нарушение геометрической формы коллектора (бочкообразность, овальность, конусность и т.д.); вибрации щеткодержателей; возвышение над коллектором миканитовых прокладок; неправильная регулировка нажатия на щетку; чрезмерный износ щеток; неплотное закрепление траверсы, пальцев или щеткодержателей; неправильная регулировка зазора между щеткодержателем и поверхностью коллектора; плохая пришлифовка щеток к коллектору; заедание щеток в щеткодержателях

(тугая посадка); обрыв уравнительных соединений; неровности поверхности коллектора и другие причины механического характера.

К *потенциальным причинам* относят повышение напряжения между соседними коллекторными пластинами, превышающее допустимое значение.

Электромагнитные причины обусловлены накоплением в коммутируемых секциях якоря запаса электромагнитной энергии $0{,}5\,L_c i^2$, которая, разряжаясь через щетки и коллекторные пластины, является причиной нарушения коммутации.

Любая из этих причин может вызвать сильное искрение, способное перейти в круговой огонь по коллектору, кроме того, искрение может быть вызвано не одной, а несколькими причинами.

Искрение на коллекторе оценивают степенью или классом:

– степень 1 — искрение отсутствует;

– степень $1^1/_4$ — слабое точечное искрение под небольшой частью края щетки, не вызывающее почернения коллектора и появления нагара на щетках;

– степень $1^1/_2$ — слабое искрение под большей частью щетки, приводящее к появлению следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протиранием бензином, и следов нагара на щетках;

– степень 2 — искрение под всеми краями щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и при перегрузках. Приводит к появлению следов почернения на коллекторе, не устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках;

– степень 3 — значительное искрение под всеми краями щетки, с появлением крупных вылетающих искр, приводящее к значительному почернению коллектора, не устраняемому протиранием бензином, а также к подгару и разрушению щеток. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования (изменения направления вращения ротора) машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы.

Продолжительная надежная работа коллекторно-щеточного узла обеспечивается только при степени искрения, не превышающем $1^1/_2$.

Ток от щетки к коллектору и обратно передается следующими способами:

– посредством механического контакта между щеткой и коллектором;

– через графитовую токопроводящую пыль, которая образуется от трения щеток о коллектор;

– через ионизированные воздушные щели, образующиеся между коллектором и щеткой и являющиеся хорошей токопроводящей зоной.

Если рассмотреть через увеличительные средства (лупу, микроскоп и др.) контактные поверхности щетки и коллектора, то обнаруживаются сплошные неровности, через которые проходит ток от щетки к коллектору. Плотность тока в этих неровностях достигает нескольких тысяч ампер на мм^2, поэтому эти точки накаляются до красного и белого каления. Однако эти неровности постоянно разрушаются, время существования контакта невелико, щетки и коллектор не успевают нагреться.

От действия влаги, которая есть в воздухе, при прохождении тока через слой щеточного контакта возникает явление электролиза, из-за чего на поверхности коллектора образуется блестящая пленка оксидов (так называемая политура), имеющая различную окраску (фиолетовую, розовую, коричневую, синестальную). «Политура» является признаком хорошей коммутации, так как она увеличивает переходное сопротивление щеточного контакта и уменьшает искрение. Сильное искрение разрушает «политуру», после чего появляются следы нагара.

Коммутация. Как указывалось выше, обмотка якоря состоит из отдельных секций, витков, которые присоединены к коллекторным пластинам. При вращении якоря коллекторные пластины и секции якоря непрерывно меняют свое положение относительно щеток и полюсов, которые закреплены неподвижно.

Процесс изменения направления тока в секции обмотки якоря, связанный с ее переходом из одной параллельной ветви в другую, называется *коммутацией*, а секция — *коммутируемой*.

Время $T_к$, в течение которого секция замкнута накоротко щеткой и коммутируется, называется *периодом коммутации*.

$$T_к = \frac{60}{Kn}\frac{b_щ}{b_k}, \qquad (2.29)$$

где K — число коллекторных пластин;

n — частота вращения якоря, об/мин;
$b_щ$ — ширина щетки;
b_k — расстояние между серединами коллекторных пластин.

Обычно $T_к$ равно 0,001—0,0003 с.

На рис. 2.25 показаны три положения одной и той же коммутируемой секции обмотки (выделена жирными линиями) в процессе вращения якоря. Ширина щетки $b_щ$ принята равной коллекторной пластине, а толщина изоляции между коллекторными пластинами не учитывается.

На рис. 2.25, *а* показано положение секции в начале коммутации. Щетка перекрывает пластину 1 и ток якоря $I_я$, пройдя щетку, распределяется по обеим сторонам коммутируемой секции поровну. Когда якорь вращается, то коллекторные пластины сдвигаются относительно щетки и в какой-то момент щетка равномерно перекрывает обе коллекторные пластины 1 и 2 (рис. 2.25, *б*). Тогда через коммутируемую секцию ток протекать не будет, а в параллельных ветвях он будет равен $I_я/2$.

В конце процесса коммутации (рис. 2.25, *в*) щетка сойдет с коллекторной пластины 1 и перекроет только пластину 2, вследствие чего ток в коммутируемой секции изменит свое направление по сравнению с первоначальным.

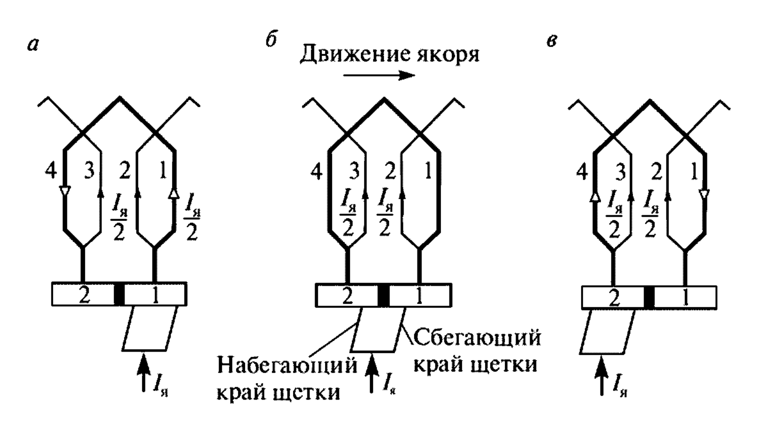


Рис. 2.25. Переход коммутируемой секции из одной параллельной ветви в другую:
а, *в* — щетка находится на первой (*а*) и второй (*в*) коллекторной пластине,
б — щетка перекрывает обе коллекторные пластины

Прямолинейная и криволинейная коммутация. При очень малой частоте вращения $n \to 0$ ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции практически не возникает. Вследствие этого плотность тока под набегающим и сбегающим краями щеток остается неизменной. Из этого следует, что ток в коммутируемой секции будет изменяться по линейному закону (прямая *1*, рис. 2.26).

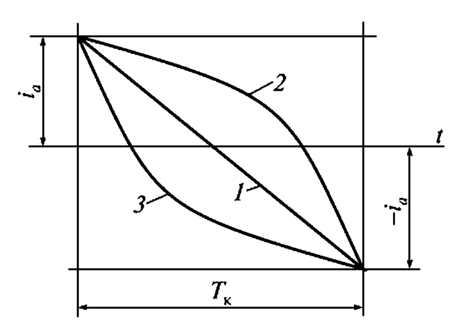


Рис. 2.26. График прямолинейной и криволинейной коммутации:
1 — линия прямолинейной коммутации; *2* — линия замедленной криволинейной коммутации; *3* — линия ускоренной криволинейной коммутации

В современных электрических машинах ТПС период коммутации $T_к$ очень мал и составляет приблизительно 10^{-3}—10^{-5} с. За такой очень и очень малый промежуток времени ток в коммутируемой секции должен изменить свое направление. Поэтому согласно правилу Ленца возникает ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -L_с(di/dt), \qquad (2.30)$$

где $L_с$ — индуктивность секций;
I — ток секции.

Обычно щетка перекрывает не одну, а несколько коллекторных пластин, и в одном пазу якоря находится несколько пазовых сторон, принадлежащих разным секциям, одновременно находящихся в состоянии коммутации. Поэтому изменение магнитного потока каждой из этих частей индуктирует в пазовых сторонах других секций ЭДС взаимоиндукции:

$$e_м = -M_с(di/dt), \qquad (2.31)$$

где $M_с$ — взаимная индуктивность одновременно коммутирующих секций.

ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимоиндукции направлены в одну сторону, поэтому суммируются и образуют реактивную ЭДС:

$$e_р = e_L + e_м = -(L_с + M_с)(di/dt). \qquad (2.32)$$

Кроме ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимоиндукции, в коммутируемой секции от действия магнитного поля якоря индуктируется

ЭДС e_{aq}, направление которой определяется правилом правой руки. Таким образом, эта ЭДС также стремится сохранить прежнее направление тока и также замедляет процесс коммутации:

$$e_{aq} = 2\,B_{aq} w_{с}\, l_{\delta}\, v_{a}, \qquad (2.33)$$

где B_{aq} — индукция поля реакции якоря;
$w_{с}$ — число витков в секции;
v_{a} — окружная скорость якоря;
l_{δ} — длина активной стороны коммутируемой секции якоря.

Все рассмотренные ЭДС — e_L, $e_{м}$, e_{aq} — замедляют процесс коммутации и являются вредными. Коммутация становится криволинейной замедленной (см. рис. 2.26, кривая *2*). При замедленной коммутации изменяется плотность тока под набегающим и сбегающим краями щетки. Под набегающим краем щетки плотность тока уменьшается, а под сбегающим — возрастает, причем до такой величины, что часть тока будет замыкаться по воздуху в виде искр. Искрение на коллекторе вызывает нагревание и порчу его поверхности, нарушение работы щеточного аппарата, вследствие чего снижается надежность машины.

Способы улучшения коммутации. В коммутируемой секции, которая закорочена щеткой, возникает реактивная ЭДС $E_{р}$, создающая добавочный реактивный ток $I_{р}$:

$$I_{р} = \frac{E_{р}}{\sum R}, \qquad (2.34)$$

где $\sum R = R_{с} + R_{к} + R_{щ}$ — сопротивление контура коммутируемой секции;
$R_{с}$ — сопротивление секции;
$R_{к}$ — сопротивление коллектора;
$R_{щ}$ — сопротивление щеток.

Для улучшения коммутации необходимо уменьшить добавочный реактивный ток $I_{р}$ до нуля. Для этого или увеличивают $\sum R$, или уменьшают $E_{р}$, или производят оба действия одновременно.

В случае увеличения сопротивления все три составляющие $\sum R$ увеличивать нельзя. Например, если увеличивать сопротивление секций или коллектора, то уменьшится КПД машины. Наиболее приемлемым является подбор щеток с надлежащими характеристиками и сохранение «политуры» оксидной пленки на поверхности коллектора.

Для этого в машинах постоянного тока применяют щетки с повышенным значением переходного сопротивления; в машинах с тяжелыми режимами работы — электро-графитные и угольно-графитные; в низковольтных машинах — медно- или бронзо-графитные. Электрические свойства щеток характеризует величина, зависящая от их переходного сопротивления, — переходное падение напряжения на пару щеток $U_щ$ при номинальной плотности тока (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1

Электрические свойства щеток

Группа щеток, обозначение	Переходное падение напряжения на пару щеток при номинальном токе, В	Номинальная плотность тока, А/мм^2	Область применения
Графитные, Г; 611М	1,9—2,0	0,11—0,12	Для машин с облегченными условиями коммутации
Электро-графитные, ЭГ	2,0—2,7	0,10—0,15	Для машин со средними и затруднительными условиями коммутации
Угольно-графитовые, УГ; Т	2,0	0,06—0,07	Для машин со средними условиями коммутации
Медно-графитные, М; МГ	0,2—1,5	0,15—0,20	Для машин низковольтных (до 48 В), контактных колец

Для уменьшения реактивной ЭДС $E_р$ целесообразно уменьшить глубину паза или увеличить его ширину, так как ЭДС самоиндукции зависит от индуктивности коммутируемой секции, т.е. от глубины паза якоря.

ЭДС взаимоиндукции зависит от ширины щетки: чем шире щетка, тем большее количество коллекторных пластин она перекрывает и тем большее количество секций вступает в процесс коммутации, вызывая увеличение ЭДС взаимоиндукции. Однако сделать узкие щетки, равные ширине одной коллекторной пластины, невозможно из-за недостаточной механической прочности. Площадь щетки определяется ее плотностью тока, поэтому при узкой щетке

необходимо увеличивать длину коллектора, что в ограниченных габаритах электрических машин ТПС сделать очень сложно. Обычно ширина щетки составляет 2—3 коллекторных деления.

Эффективным средством уменьшения магнитной связи между переключаемыми секциями является их укорочение, т.е. выполнение с укороченным шагом ($y < \tau$). В этом случае для достижения предельной индукции в зубцах якоря целесообразно увеличивать ширину паза и уменьшать его глубину.

Добавочные полюсы предназначены для создания в зоне коммутации магнитного поля такой величины и направления, чтобы наводимая этим полем в коммутируемой секции ЭДС компенсировала реактивную ЭДС $E_р$. Полюсный наконечник сердечника выполняют заостренным (рис. 2.27), чтобы магнитный поток, созданный добавочным полюсом, был направлен только в коммутируемую секцию.

Обмотки возбуждения добавочных полюсов всегда включают последовательно с обмоткой якоря для того, чтобы происходило автоматическое усиление действия добавочных полюсов при увеличении внешней нагрузки, вызывающей усиление реакции якоря и реактивной ЭДС в коммутируемой секции. Для предотвращения сползания обмотки возбуждения со стороны наконечника прикреплены латунные угольники.

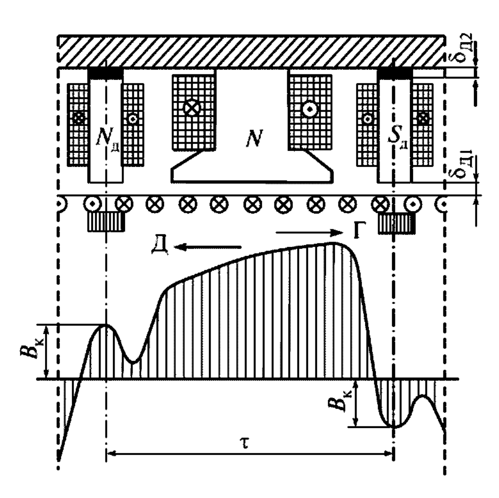


Рис. 2.27. Результирующее магнитное поле в воздушном зазоре машины с добавочными полюсами в генераторном (Г) и двигательном (Д) режимах

Добавочные полюсы обеспечивают удовлетворительную коммутацию только в пределах номинальной нагрузки. При перегрузке происходит насыщение магнитной цепи добавочных полюсов. В этом случае реактивная ЭДС $E_р$ изменяется пропорционально току нагрузки, а ЭДС, созданная добавочным полюсом, не будет увеличиваться. Поэтому сердечник добавочного по-

люса делают ненасыщенным. Для этой цели между сердечником добавочных полюсов и остовом машины размещают второй зазор, где устанавливают диамагнитную прокладку из алюминия, гетинакса текстолита и других диамагнитных материалов.

Полярность добавочных полюсов выбирают следующим образом. По направлению вращения якоря генератора полярность добавочного полюса такая же, как у следующего главного полюса, а у двигателя — как у предшествующего.

Число витков обмотки возбуждения добавочных полюсов рассчитывают так, чтобы при номинальной нагрузке происходила компенсация реактивной ЭДС. Если число витков обмотки возбуждения будет больше расчетного, то коммутация будет ускоренной (кривая *3*, см. ниже рис. 2.37). При значительных нагрузках это может привести к искрению под набегающим краем щетки.

2.4. Генераторы постоянного тока

По способу возбуждения генераторы постоянного тока разделяют на две группы — генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением. Генераторы с независимым возбуждением разделяют на генераторы с электромагнитным возбуждением и генераторы с магнитоэлектрическим возбуждением. Генераторы с самовозбуждением делят на генераторы с параллельным возбуждением, с последовательным возбуждением, со смешанным возбуждением.

Генераторы с независимым возбуждением применяют в ТПС довольно широко. Это тяговые генераторы тепловозов, тяговые электродвигатели локомотивов и электропоездов в режиме электрического торможения. При электрическом торможении тяговые электродвигатели последовательного возбуждения переводят в режим генератора независимого возбуждения — создается тормозной электромагнитный момент, который реализуется в тормозную силу поезда.

Схема для снятия характеристик генератора независимого возбуждения представлена на рис. 2.28.

При снятии *характеристики холостого хода* рубильник должен быть разомкнут, а приводным двигателем приводят генератор Г во вращение до номинального значения. При изменении сопротивления регулировочного реостата $R_{\text{рг}}$ (например, уменьшении) увеличивается ток возбуждения $I_{\text{в}}$ и созданный им магнитный поток полюсов Ф. Изменение магнитного потока Ф вызывает изме-

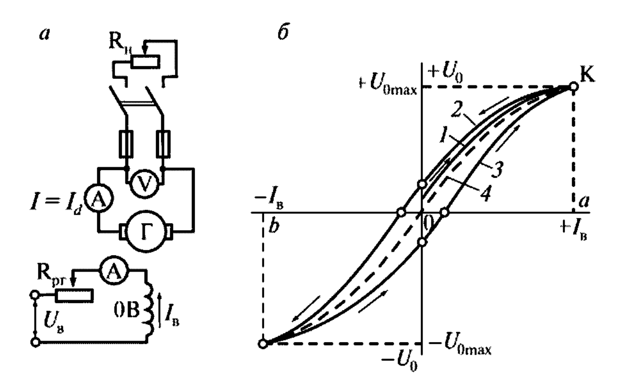


Рис. 2.28. Схема генератора с независимым возбуждением (*а*) и характеристика его холостого хода (*б*)

нение ЭДС $E = C_e \Phi\ n$. При достижении магнитного насыщения магнитный поток машины Ф и ЭДС *E* при увеличении $I_в$, не увеличиваются.

При ЭДС, равной 1,15 $U_н$, уменьшают ток возбуждения до нулевого значения. Полученная таким образом кривая *1* проходит в первой четверти до пересечения с осью ординат. Изменим направление тока возбуждения и постепенно увеличиваем его значение от 0 до «минус» $I_в$ = 0,6, получаем кривую *2*, которая совместно с кривой *1* и *3* образует гистерезисную петлю, определяющую свойства стали полюсов и ярма. Проведя между линиями *1* и *3* среднюю линию *4*, получим так называемую расчетную характеристику холостого хода.

Вначале характеристика холостого хода представляет собой прямую линию. Это объясняется тем, что при малых токах возбуждения почти вся МДС идет на преодоление магнитным потоком воздушного зазора — среду с постоянной магнитной проницаемостью. В дальнейшем по мере увеличения тока возбуждения $I_в$ и соответственно магнитного потока Ф сталь машины начинает насыщаться, поэтому получаем сначала средненасыщенную часть характеристики холостого хода, так называемое *колено кривой*, а затем сильнонасыщенную часть.

Точка K, соответствующая номинальному напряжению $U_н$, тяговых электрических машин обычно должна располагаться на колене кривой намагничивания. Это делают по следующим причи-

нам — во-первых, расходуется меньше стали, а в тяговые машины при ограниченных габаритах необходимо вписать бóльшую мощность. Во-вторых, при работе машины на прямолинейной части кривой напряжение генератора неустойчиво. В третьих, при работе машины на насыщенной части кривой ограничивается возможность регулирования напряжения.

Таким образом, по характеристике холостого хода можно судить о насыщении магнитной цепи генератора при номинальном режиме работы.

Для снятия *нагрузочной характеристики* (рис. 2.29) с помощью приводного двигателя приводят во вращение генератор и затем, поддерживая неизменными частоту вращения и ток якоря, изменяют ток возбуждения так же, как и при снятии характеристики холостого хода, но снимают ее в первой четверти (кривая *1* на рис. 2.29). Нагрузочная характеристика по виду похожа на характеристику холостого хода, но проходит несколько ниже нее вследствие падения напряжения в обмотке якоря и размагничивающего действия реакции якоря.

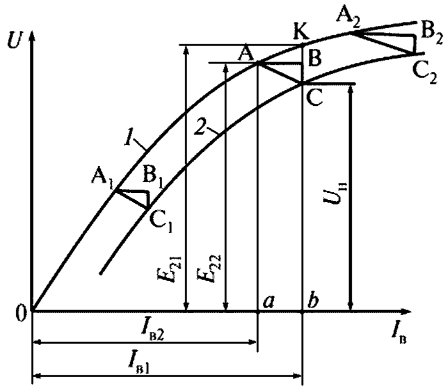


Рис. 2.29. Нагрузочная характеристика генератора

Нагрузочная характеристика и характеристика холостого хода, построенные в одних осях координат, позволяют построить так называемый характеристический треугольник. Посредством треугольника можно оценить влияние падения напряжения и реакции якоря на напряжение генератора, а также он может быть использован для построения внешней и регулировочной характеристик генератора.

Для этого из точки С (см. рис. 2.29), соответствующей номинальному напряжению $U_н$, проводим вертикальную прямую до пересечения с характеристикой холостого хода *1* — получим точку K. На отрезке СK откладываем точку В, причем отрезок СВ равен падению напряжения $I_а R_а$. Затем из точки В проводим горизонтальную прямую до пересечения в точке А с характеристикой холостого

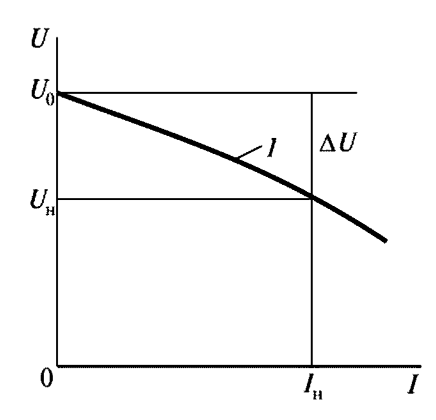


Рис. 2.30. Внешняя характеристика и характеристический треугольник генератора

хода, получим горизонтальный катет AB искомого треугольника ABC. Отрезок BK соответствует размагничивающему действию реакции якоря.

Из точки A проводим вертикальную прямую до пересечения с осью абсцисс. Отрезок AB, равный разности токов $I_{в1} - I_{в2}$, представляет собой ток возбуждения, компенсирующий размагничивающее действие реакции якоря.

Характеристический треугольник можно построить в любой точке нагрузочной характеристики.

Внешняя характеристика (рис. 2.30) определяет зависимость напряжения генератора от нагрузки, когда ток возбуждения не регулируется.

Для снятия внешней характеристики генератор приводят во вращение до номинальной частоты вращения и нагружают его до номинального тока при номинальном напряжении. Затем уменьшают ток до нуля (холостой ход) и записывают показания приборов.

При переходе к холостому ходу ($I = 0$) напряжение возрастает на вполне определенную величину ΔU, которая называется ***номинальным изменением напряжения генератора***. В генераторах независимого возбуждения

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_н}{U_н} \cdot 100\,\%. \qquad (2.35)$$

Для генераторов с независимым возбуждением $\Delta U = 5$—10 %. Причинами изменения напряжения при изменении тока нагрузки являются: размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в обмотках якоря.

Регулировочная характеристика показывает, как нужно регулировать ток возбуждения при изменении тока нагрузки, чтобы напряжение на его зажимах оставалось неизменным.

Для снятия регулировочной характеристики генератор приводят во вращение до номинальной частоты вращения и затем, изменяя ток возбуждения $I_в$, устанавливают номинальное напряжение на зажимах генератора. После этого подключают внешнюю нагрузку и постепенно увеличивают ток нагрузки. Напряжение будет уменьшаться, как это следует из внешней характеристики. Изменяя ток возбуждения, поддерживают постоянное напряжение на зажимах. Увеличивая ток нагрузки I до номинального значения ($I = I_н$) и затем уменьшая его до холостого хода $I = 0$, поддерживая неизменным напряжение, получим две характеристики *1* и *2* (рис. 2.31) — восходящую и нисходящую. Средняя кривая *3*, проведенная между нисходящей и восходящей ветвями, считается практической регулировочной характеристикой.

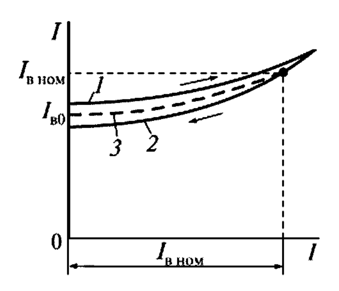


Рис. 2.31. Регулировочная характеристика генератора

Генератор с параллельным возбуждением относится к генераторам с самовозбуждениям. Он не требует особого источника тока для питания обмотки возбуждения и создает в пределах номинальной нагрузки довольно устойчивое напряжение. На ТПС подобные генераторы применяют в качестве генераторов управления электровозов и электропоездов, вспомогательных генераторов тепловозов и др.

На рис. 2.32, *а* показана схема генератора с самовозбуждением, из которой видно, что, для того чтобы при разомкнутом рубильнике по обмотке протекал ток и создавался основной магнитный поток главных полюсов, необходимо напряжение — ЭДС обмотки якоря. Но ЭДС в обмотке якоря будет индуктироваться лишь в том случае, если будет магнитный поток главных полюсов. Получается замкнутый круг — ЭДС будет индуктироваться лишь в том случае, если будет магнитный поток главных полюсов, а магнитный поток появится, только если ЭДС создаст ток возбуждения. Поэтому для того чтобы генераторы с самовозбуждением могли нормально работать, необходимо соблюдать определенные условия самовозбуждения:

– наличие остаточного магнитного потока главных полюсов;

– правильное подключение обмотки возбуждения к обмотке якоря;

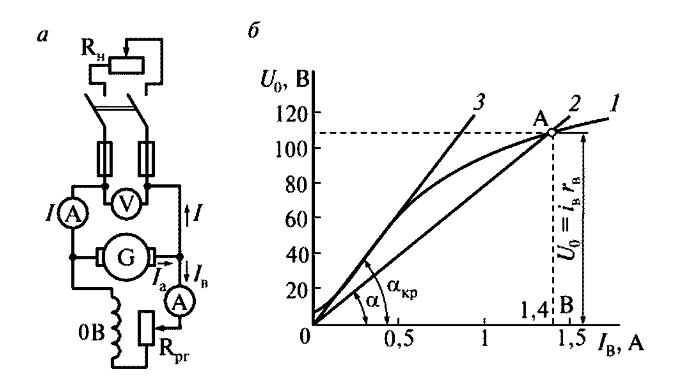


Рис. 2.32. Схема генератора с параллельным возбуждением (*а*) и характеристика его холостого хода (*б*)

– сопротивление цепи возбуждения должно быть ниже некоторого критического значения;

– частота вращения якоря должна быть выше критической.

Для самовозбуждения генератора необходимо, чтобы в нем был небольшой (2—3 % от нормального) остаточный магнитный поток. В уже работающей машине практически всегда присутствует магнитный поток такого значения $\Phi_{ос}$. Вновь изготовленную машину, которая по каким-то причинам размагнитилась, следует намагнитить, пропустив постоянный ток по обмотке возбуждения. На ТПС этим источником тока может быть аккумуляторная батарея.

Процесс самовозбуждения протекает следующим образом. Небольшая ЭДС, индуктированная в обмотке якоря магнитным потоком, создает малый ток $I_в$ в обмотке возбуждения. Ток $I_в$ увеличивает магнитный поток главных полюсов и, следовательно, происходит увеличение ЭДС и т.д. Этот процесс самовозбуждения продолжается до тех пор, пока напряжение генератора не достигнет установившегося значения.

На рис. 2.32, *б* показаны: кривая *1* — *характеристика холостого хода* и прямая *2* — зависимость падения напряжения от тока возбуждения $I_в\ R_в = f(I_в)$, представляющая собой прямую, расположенную под углом α к оси абсцисс, так как $R_в$ = const:

$$\operatorname{tg}\alpha = U/I_а = R_в. \tag{2.36}$$

В этом случае каждому значению $I_в R_в$ соответствует особая прямая, выходящая из начала под углом α.

Точка пересечения А кривой *1* и прямой *2* соответствует окончанию процесса самовозбуждения.

Если увеличить сопротивление $R_в$, т.е. угол α, то точка А будет скользить по характеристике холостого хода в направлении к точке 0 и в конце концов станет касательной *3* к характеристике холостого хода. Это сопротивление называют критическим $R_{кр}$.

Самовозбуждение зависит от частоты вращения генератора. Из формулы $E = С_е Ф n$, следует, что при $n = 0$, $E = 0$.

Если снять значение и построить зависимость $E = f(n)$ генератора с параллельным возбуждением (рис. 2.33), представляющую собой характеристику самовозбуждения, то из нее будет следовать, что существует значение частоты вращения $n = n_{кр}$, ниже которого самовозбуждение невозможно. Это значение $n = n_{кр}$ называют *критической частотой вращения*. Процесс самовозбуждения будет начинаться только при $n > n_{кр}$. В этом случае происходит увеличение напряжения. Критическая частота вращения зависит от сопротивления цепи возбуждения и с увеличением последнего возрастает.

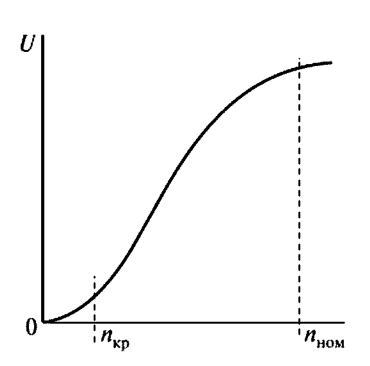


Рис. 2.33. Характеристика самовозбуждения генератора

Характеристика холостого хода генератора с параллельным возбуждением может быть снята только в одной четверти, так как он самовозбуждается лишь в одном направлении.

Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением более крутая, чем у генератора с независимым возбуждением. Объясняется это тремя причинами. Первые две — те же, что и у генератора с независимым возбуждением (размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжение в обмотках якоря). Третья причина — уменьшение тока возбуждения $I_в$ из-за уменьшения величины магнитного потока Ф, вследствие чего индуктированная этим потоком ЭДС уменьшается.

Поэтому номинальное изменение напряжения у генератора с параллельным возбуждением больше и составляет U = 10—30 %.

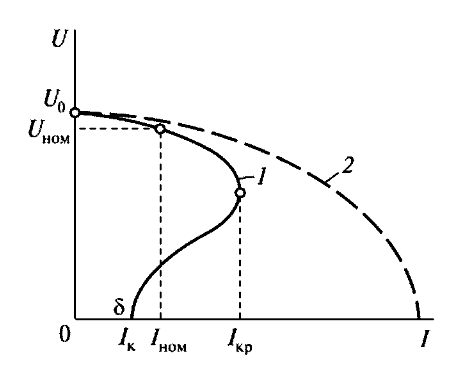


Рис. 2.34. Внешняя характеристика генератора

Если продолжать увеличение тока нагрузки, то будет происходить уменьшение напряжения. Однако при некотором максимальном значении тока характеристика делает петлю и приходит в точку $I_к$ (рис. 2.34) на оси абсцисс. Это объясняется тем, что помимо причин, вызывающих уменьшение напряжения в генераторе независимого возбуждения (реакция якоря и падение напряжения в обмотке якоря), действует еще и третья причина, которая становится преобладающей, — из-за падения напряжения ток возбуждения уменьшается, следовательно, магнитный поток Ф также уменьшается и магнитная цепь становится менее насыщенной. Ток $I_к$ становится меньше номинального тока нагрузки $I_{ном}$, так как определяется только потоком остаточного намагничивания. Ток $I_к$ превышает $I_{ном}$ в 2—2,5 раза. Если такое значение тока не вызывет круговой огонь по коллектору или повреждение изоляции, то такой ток не опасен для машины.

Кривая *1* (см. рис. 2.34) получается при постепенном уменьшении сопротивления $R_н$. Однако в реальных эксплуатационных условиях возможно так называемое *внезапное короткое замыкание,* при котором магнитная система машины не успевает размагнититься и ток $I_к$ достигает опасных для машины значений (8—18) $I_н$ (кривая *2* на рис. 2.34). При таком резком изменении тока на валу генератора возникает значительный тормозящий момент, а на коллекторе появится сильное искрение, которое может перейти в круговой огонь. Следовательно, внезапное короткое замыкание генератора с параллельным возбуждением (особенно большой мощности) является опасным, поэтому такие генераторы нужно защищать от перегрузки и короткого замыкания. Для защиты генераторов с параллельным возбуждением на тяговом подвижном составе применяют плавкие предохранители, а в некоторых случаях — релейную защиту. Более подробно это рассмотрено в курсе «Электрические аппараты и цепи».

Регулировочная характеристика $I_в = f(I)$ генератора с параллельным возбуждением при U = const и n = const практически не отличается от соответствующей характеристики генератора с независимым возбуждением.

В ***генераторах с последовательным возбуждением*** (рис. 2.35, *а*) $I_в = I_а = I$ и поэтому при n = const имеются только две независимые переменные: U и I. Вследствие этого генератор имеет только одну характеристику, а именно внешнюю $U = f(I)$ при n = const (рис. 2.35, *б*). Характеристики холостого хода, нагрузочную и другие снять невозможно. Их можно снять только переключив обмотки возбуждения на независимое возбуждение.

Так как напряжение генератора на зажимах нестабильно и сильно меняется с изменением нагрузки, то он непригоден для питания потребителей. При электрическом торможении из-за нестабильности тормозного момента будет нестабильной и тормозная сила поезда. По этой причине тяговые электродвигатели, которые имеют последовательное возбуждение, при электрическом торможении переключают в режим генератора с независимым возбуждением.

В ***генераторах со смешанным возбуждением*** (рис. 2.36) каждый главный полюс имеет по две обмотки. Одна из обмоток (Ш1—Ш2) выполнена с большим количеством витков и включена параллельно обмотке якоря, а другая обмотка (С1—С2), имеющая провод та-

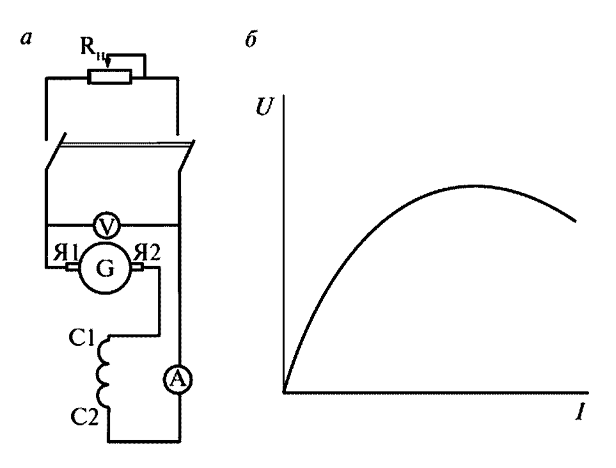


Рис. 2.35. Схема генератора с последовательным возбуждением (*а*) и его внешняя характеристика (*б*)

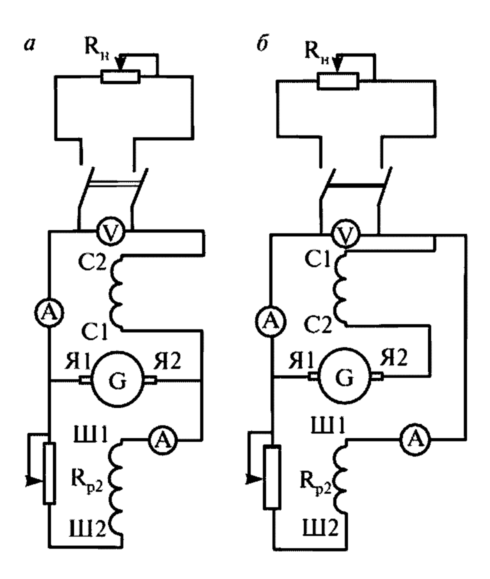


Рис. 2.36. Схема генератора со смешанным возбуждением: с коротким (*а*) и с длинным (*б*) шунтом

кого же сечения, как обмотка якоря, и малое число витков, соединена последовательно с обмоткой якоря. Магнитные потоки, созданные этими обмотками (параллельной и последовательной), могут быть направлены в одну сторону — согласное включение или в противоположные стороны — встречное включение. Схема генератора может быть выполнена с коротким (см. рис. 2.36, *а*) или с длинным (см. рис. 2.36, *б*) шунтом. Разницы между этими схемами практически нет, так как сопротивление последовательной обмотки небольшое и падение напряжение на зажимах очень мало.

Снятие внешней, регулировочной и нагрузочной характеристик генератора со смешанным возбуждением производят так же, как и у генератора с параллельным возбуждением.

В режиме холостого хода генератор со смешанным возбуждением работает как генератор с параллельным возбуждением, так как ток последовательной обмотки возбуждения при коротком шунте равен нулю, а при длинном — ничтожно мал.

Внешняя характеристика генератора при согласном включении — жесткая (рис. 2.37, кривая *1*), т.е. напряжение на зажимах генератора при увеличении тока почти не изменяется. Изменяя

число витков последовательной обмотки возбуждения можно менять положение кривой внешней характеристики. Так, увеличивая число витков последовательной обмотки возбуждения можно получить внешнюю характеристику, у которой с увеличением тока увеличивается напряжение (см. рис. 2.37, кривая *2*).

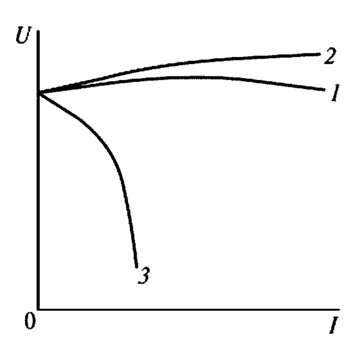


Рис. 2.37. Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения:
1, *2* — внешние характеристики при согласном включении; *3* — внешняя характеристика при встречном включении

Встречное включение обмоток возбуждения применяется в некоторых типах сварочных генераторов, так как их режим работы близок к режиму короткого замыкания. Согласное включение обмоток возбуждения применяется в тех случаях, когда нужно автоматически поддерживать стабильное напряжение на зажимах генератора независимо от тока нагрузки.

2.5. Электродвигатели постоянного тока

Общие сведения. Двигатели постоянного тока применяют в ТПС. Это коллекторные тяговые электродвигатели и коллекторные вспомогательные машины.

Как указывалось выше, электрические машины постоянного тока обладают свойством обратимости, т.е. они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Поэтому по способу возбуждения двигатели постоянного тока подразделяют аналогично генераторам на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Рассмотрим различия режимов генератора и двигателя. На рис. 2.38, *а* показана схема генератора постоянного тока параллельного возбуждения, а на рис. 2.38, *б* — двигателя того же возбуждения.

Главное отличие заключается в преобразовании энергии: генератор преобразует механическую энергию в электрическую, а двигатель — наоборот. Генератор необходимо всегда приводить во вращение, т.е. подводить механическую энергию, а двигатели вращаются самостоятельно от подведенной электроэнергии. Электро-

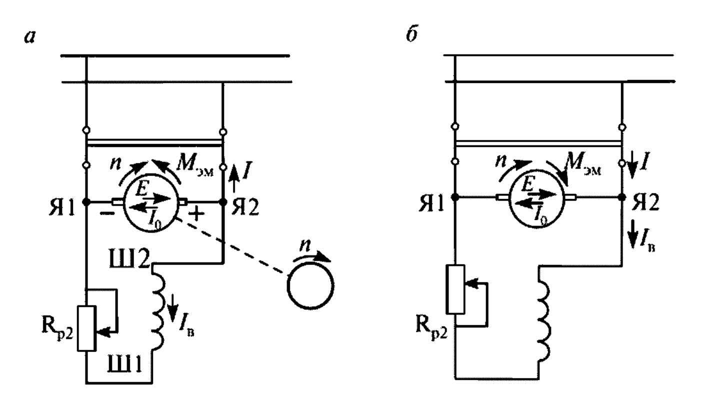


Рис. 2.38. Работа машины постоянного тока в генераторном (*а*) и двигательном (*б*) режимах

магнитный момент генератора является тормозным, т.е. направлен против направления вращения, а в двигателе он совпадает с направлением вращения, т.е. является вращающим.

В генераторе ток и ЭДС якоря совпадают по направлению, а в двигателе они направлены в противоположные стороны. Поэтому ЭДС двигателя называют противо-ЭДС.

Уравнение напряжения для цепи якоря двигателя:

$$U = E + I_а R_а. \tag{2.37}$$

Из равенства (2.37) следует, что в режиме двигателя всегда $U > E$.

Из формулы (2.37) определим значение тока:

$$I = (U - E)/R_а. \tag{2.38}$$

Электромагнитный момент двигателя

$$M_{эм} = P_{эм}/\omega = 9{,}55\,P_{эм}/n. \tag{2.39}$$

Он расходуется на уравновешивание следующих тормозных моментов:

– момента потерь M_0;

– момента нагрузки на валу двигателя, создаваемого приводом — устройством, которое приводит во вращение двигатель — M_2:

$$M_2 = P_2/\omega; \tag{2.40}$$

– динамического момента — $M_{дин}$:

$$M_{эм} = M_0 + M_2 \pm M_{дин}, \tag{2.41}$$

$$M_{эм} = M_{ст} \pm M_{дин}, \qquad (2.42)$$

где $M_{ст} = M_0 + M_2$ — статический момент сопротивления.

При установившемся режиме, когда ω — const и $M_{дин} = 0$, $M_{эм} = M_{ст}$.

Обычно M_0 мал по сравнению с M_2, поэтому приблизительно можно считать, что при установившемся режиме работы $M_{эм} = M_{ст}$.

При вращении двигателем какого-либо устройства к его валу прикладывается момент сопротивления $M_с$, который является тормозящим и действует навстречу электромагнитному моменту двигателя $M_{эм} = M_с$.

Увеличение $M_с$ (например, при движении поезда на подъем) вызывает увеличение $M_{эм}$, вследствие чего возрастает ток двигателя. Следовательно, как и в любой электрической цепи, ток двигателя определяет нагрузка.

Пуск двигателя. Из формулы (2.38) видно, что ток двигателя зависит от напряжения U, противо-ЭДС E и сопротивления $R_а$. В момент подачи напряжения на обмотку статора ротор из-за своей инерции не может мгновенно достичь номинальной частоты вращения, поэтому $n = 0$, следовательно, противо-ЭДС также будет равна нулю. Если напряжение в формуле (2.38) принять за 100 %, то противо-ЭДС составит 92—95 %. Тогда ток $I_а$ будет ограничиваться только внутренним сопротивлением $R_а$, которое очень мало:

$$I_а = U/R_а. \qquad (2.43)$$

Например, для тягового электродвигателя НБ-418К6 $R_а$ составляет 0,011 Ом. Поэтому при прямом пуске с $U = U_н$ ток якоря будет недопустимо велик $I_а = (50—100)\, I_н$. Такая величина тока очень опасна для двигателя, так как может вызвать круговой огонь по коллектору и чрезмерно большой пусковой момент, который окажет ударное действие на вращающие части машины с последующим их разрушением. Кроме того, большой ток может вызвать падение напряжения в сети, что неблагоприятно скажется на работе других потребителей.

Из формулы (2.43) видно, что для ограничения пусковых токов необходимо или уменьшить величину питающего напряжения $U_д$, или увеличить сопротивление $R_а$. На тяговом подвижном составе (ТПС) применяю оба способа. На электровозах и электропоездах переменного тока и на тепловозах применяют первый способ.

На тяговые электродвигатели подают напряжение $U_п$ такой величины, чтобы по обмоткам якоря протекал пусковой ток $I_п$, который обеспечивает трогание ТПС с места и не вызывает нарушения нормальной работы тяговых электродвигателей:

$$U_п = I_п R_а.$$

На электроподвижном составе (ЭПС) постоянного тока применяют пусковой реостат $R_п$, сопротивление которого можно изменять в широких пределах (рис. 2.39). Контакты К1—К3 — это контакты, при включении и отключении которых изменяется величина сопротивление $R_п$.

При включении пускового реостата в цепь двигателя

$$U_д = E + I_а(R_п + R_а), \tag{2.44}$$

откуда

$$I_а = \frac{U_д}{R_п + R_а}, \tag{2.45}$$

поэтому величина сопротивления пускового реостата будет равна

$$R_п = \frac{U}{I_п} - R_а. \tag{2.46}$$

Ступени пускового реостата определяют, исходя из максимальных и минимальных величин тока.

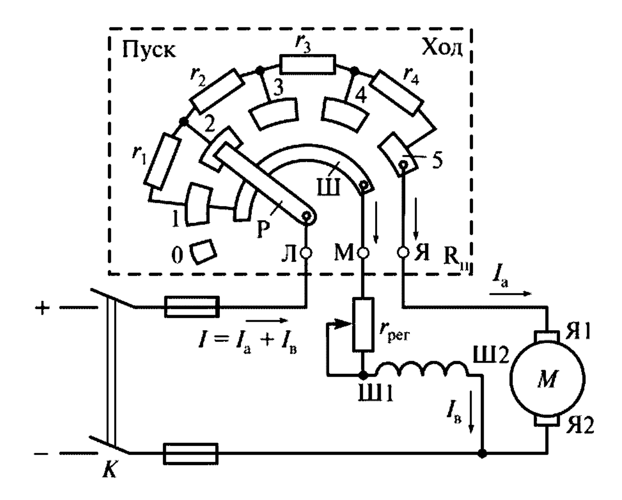


Рис. 2.39. Пусковой реостат двигателя параллельного возбуждения

Реверсирование — изменение направления вращения якоря. Для реверсирования двигателя постоянного тока необходимо изменить полярность питания якоря, оставив без изменения полярность питания обмотки возбуждения, или наоборот, изменить полярность питания обмотки возбуждения, оставив без изменения полярность питания обмотки якоря.

Регулирование частоты вращения. Из формулы $E = \text{С}\Phi\omega$ или $E = \text{С}_\text{е}\Phi n$ определим частоту вращения якоря:

$$n = \frac{E}{\text{С}_\text{е}\Phi} = \frac{U - I_\text{а}(R_\text{а} + R_\text{п})}{\text{С}_\text{е}\Phi}. \qquad (2.47)$$

Из формулы (2.47) следует, что частота вращения якоря зависит от величины подведенного напряжения, падения напряжения в цепи якоря, сопротивления пускового реостата, магнитного потока и конструктивных особенностей машины. Все эти способы регулирования частоты вращения якоря (кроме $\text{С}_\text{е}$) применяют в ТПС. Они подробно рассматриваются в курсах «Электрические аппараты и цепи» и «Основы тяги поездов».

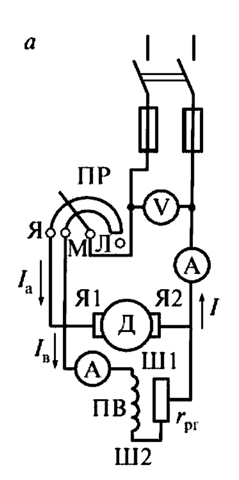
Двигатель с параллельным возбуждением иногда называют *двигателем с независимым возбуждением,* так как ток обмотки возбуждения не зависит от тока якоря. В цепь якоря включен пусковой реостат $R_\text{п}$, а в цепь обмотки возбуждения — регулировочный реостат $R_\text{рг}$, предназначенный для изменения тока возбуждения и магнитного потока главных полюсов. На рис. 2.39 показана схема пуска двигателя с параллельным возбуждением с включенным пусковым реостатом. Общая схема работы двигателя приведена на рис. 2.40, *а*.

Экспериментально снимают следующие виды характеристик: рабочие — представляющие собой зависимости n, M от полезной мощности P_2; регулировочные — n, $I_\text{а}$, зависящие от магнитного потока Ф; электромеханические — n, M — от потребляемого тока; механическую — n — от M.

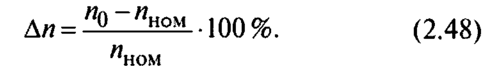
Иногда электромеханические характеристики называют *рабочими*. Действительно, $P_2 = P_1\eta = \eta UI$, так как величина напряжения U, питающего двигатель, принята постоянной неизменяющейся величиной, а ток является мерилом нагрузки, то можно считать, что рабочие характеристики в другом масштабе повторяют электромеханические.

В любом случае, при снятии рабочих характеристик вал двигателя нагружают. В простейшем случае это может быть обычная доска, которой придавливают вал двигателя, создавая тормозной момент. Для тягового электродвигателя — это масса поезда, сопротивление воздуха, профиль пути и другие факторы, создающие сопротивление движению.

При увеличении тормозного момента увеличивается ток двигателя, но магнитный поток главных полюсов несколько уменьшается из-за действия реакции якоря. Вследствие этого частота вращения n в соответствии с выражением (2.47) будет возрастать. Но



падение напряжения $I_а R_а$ вызовет уменьшение частоты вращения. Ввиду того, что влияние реакции якоря меньше, чем падение напряжения $I_а R_а$, при U = const и $I_в$ = const, рабочая характеристика $n = f(I_а)$ имеет наклон к оси абсцисс и по этой причине характеристика прямолинейна (рис. 2.40, *б*). Изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу, выраженное в процентах, называют ***номинальным изменением частоты вращения***:



$$\Delta n = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_{ном}} \cdot 100\,\%. \tag{2.48}$$

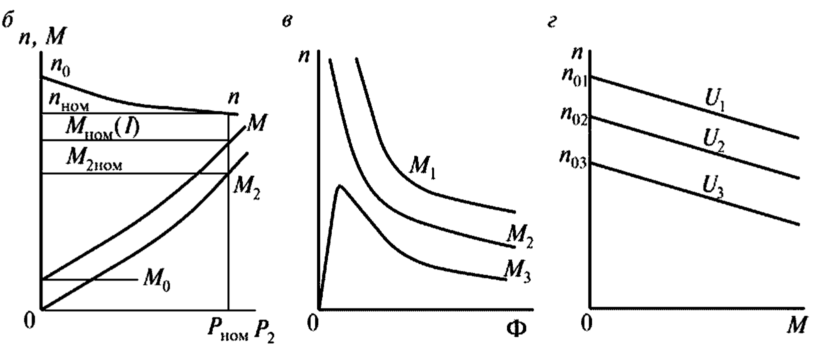


Рис. 2.40. Двигатель параллельного возбуждения и его характеристики: *а* — схема двигателя; *б* — рабочие характеристики; *в* — регулировочные характеристики; *г* — механические характеристики

Обычно для двигателей параллельного возбуждения Δn = 2—8 %, поэтому данную характеристику частоты вращения называют *жесткой*.

Зависимость полезного момента M_2 от нагрузки определяется формулой (2.42). С увеличением нагрузки частота вращения двигателя снижается. При n = const вращающий момент двигателя $M = M_0 + M_2$. Рабочие характеристики строят при условии $I_в$ = const, что обеспечивает постоянство магнитных потерь и M_0 = const. Поэтому график зависимости $M = f(I_а)$ проходит параллельно кривой $M_2 = f(I_а)$.

Если пренебречь реакцией якоря, то можно принять Ф = const. Тогда механическая характеристика указанного двигателя представляет собой прямую линию, несколько наклоненную к оси абсцисс. Угол наклона механической характеристики тем больше, чем больше значение сопротивления, включенного в цепь якоря.

При изменении напряжения на якоре U изменяется частота вращения n, а Δn остается неизменной. В итоге характеристики смещаются по высоте (рис. 2.40, *в*), оставаясь параллельными друг другу.

На рис. 2.40, *г* изображено изменение механической характеристики $n = f(M)$ при уменьшении питающего напряжения от U_1 до U_3.

Двигатель с последовательным возбуждением. Обмотка возбуждения двигателя включена последовательно с его якорем, в связи с чем ток возбуждения, а следовательно и магнитный поток главных полюсов, определяются нагрузкой на валу двигателя. Схема двигателя показана на рис. 2.41, *а*.

$$I_в = I_а = I. \qquad (2.49)$$

Следовательно,

$$Ф = k_ф I. \qquad (2.50)$$

Коэффициент пропорциональности $k_ф$ в значительном интервале нагрузок (при $I < I_н$) является практически постоянным и лишь при $I > (0{,}8–0{,}9)\, I_н$, вследствие насыщения магнитной цепи $k_ф$, начинает несколько уменьшаться. В формулу частоты вращения $n = (U - I_а R_а)/С_е Ф$ и момента $M = С_м Ф I_а$ подставим (2.45) и получим выражения:

$$n = \frac{U - I_а R_а}{С_е k_ф I}; \qquad (2.51)$$

$$M = С_м k_ф I^2. \qquad (2.52)$$

При магнитном насыщении справедливы выражения (2.20) и (2.42).

Рабочие характеристики показаны на рис. 2.41, *б*. Скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения вначале имеет гиперболический характер. По мере увеличения тока двигатель насыщается все сильнее и его частота вращения начинает изменяться по линейному закону, так как обратно пропорциональная зависимость между частотой вращения *n* и током *I* нарушается, также как и пропорциональная зависимость между *M* и *I* (см. штриховые линии).

Однако следует обратить внимание на то, что при значительном уменьшении нагрузки двигатель начинает развивать все большую частоту вращения или, как говорят, начинает «идти в разнос». При холостом ходе Ф = 0, частота вращения двигателя приобретает опасные по своим механическим последствиям значения — выпадение клиньев, крепящих обмотку якоря, разрыв бандажей и т.д.

Поэтому двигатель последовательного возбуждения нельзя включать в сеть при нагрузке менее 25—30 % от номинальной. Также нельзя применять фрикционную или ременную передачи для соединения вала двигателя с рабочим органом (нагрузкой) из-за их возможного проскальзывания.

Частоту вращения двигателя последовательного возбуждения можно регулировать изменением питающего напряжения, причем

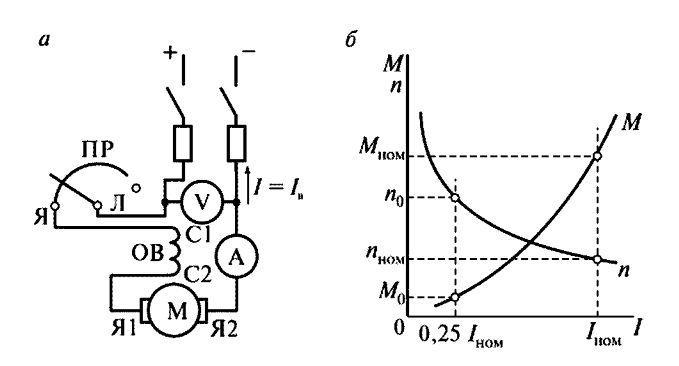


Рис. 2.41. Двигатель последовательного возбуждения:
а – схема двигателя; *б* – рабочие характеристики

напряжение можно изменять от нуля до номинального значения. Рассматриваемый способ широко применяется в ТПС.

Регулирование частоты вращения двигателя последовательного возбуждения *включением сопротивления последовательно с обмоткой якоря* (рис. 2.41, *а*) позволяет регулировать *n* от нуля до номинального значения. Однако в реостате теряется много энергии, потребляемой из контактной сети, что вызывает снижение КПД ЭПС и нагрев самого реостата. Поэтому его включают кратковременно, только на период пуска и разгона электроподвижного состава, и называют *пусковым реостатом*.

Регулирование частоты вращения *n ослаблением возбуждения* производится либо путем шунтирования обмотки возбуждения некоторым сопротивлением $R_ш$ (рис. 2.42, *а*), либо изменением числа витков (рис. 2,42, *б*). Степень шунтирования определяется выражением

$$\beta = I_в/I_а. \quad (2.53)$$

Через обмотку возбуждения проходит только часть тока якоря $i_а$, а остальная его часть проходит через резистор $R_ш$. При меньшем токе возбуждения (по сравнению с током якоря) в магнитной системе наводится меньший магнитный поток и как следует из формулы (2.42), частота вращения при том же токе получается больше, чем в режиме полного возбуждения, при котором весь ток якоря проходит по обмоткам возбуждения. Обычно через контакты включают несколько резисторов, в результате чего получают несколько ступеней возбуждения.

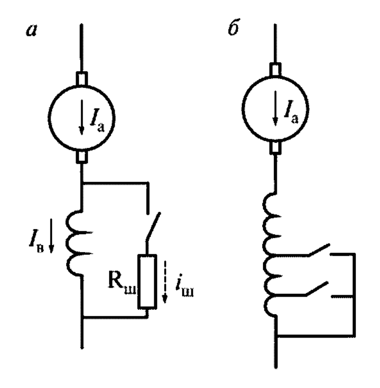


Рис. 2.42. Регулирование частоты вращения двигателя ослаблением возбуждения:
а – включением шунтирующего сопротивления; *б* – ответвлением части витков обмотки возбуждения

Другой способ изменения возбуждения основан на отключении части витков катушек. Каждая катушка должна быть секционирована и из нее нужно делать дополнительные выводы. Этот способ ослабления возбуждения не нашел применения на ТПС из-за усложнения конструкции тяговых электро-

двигателей, так как для каждой ступени ослабления возбуждения необходимо добавлять по одному выводу, размещение которых в ограниченных габаритах двигателя практически невозможно.

Двигатель смешанного возбуждения (см. рис. 2.43, *а*), как и генератор смешанного возбуждения, имеет на каждом полюсе по две обмотки возбуждения — параллельную и последовательную:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e(\Phi_1 \pm \Phi_2)}, \tag{2.54}$$

где Φ_1 и Φ_2 — магнитные потоки параллельной и последовательной обмоток возбуждения. Знак «плюс» соответствует согласному включению обмоток возбуждения, а знак «минус» — встречному.

При согласном включении обмоток возбуждения результирующий магнитный поток с увеличением нагрузки возрастает, что приводит к уменьшению частоты вращения двигателя. Характеристика частоты вращения будет располагаться между характеристиками двигателя параллельного и последовательного возбуждений. Магнитодвижущая сила обмотки параллельного возбуждения ограничивает частоту вращения при малых нагрузках. При больших значениях этой магнитодвижущей силы изменение частоты вращения

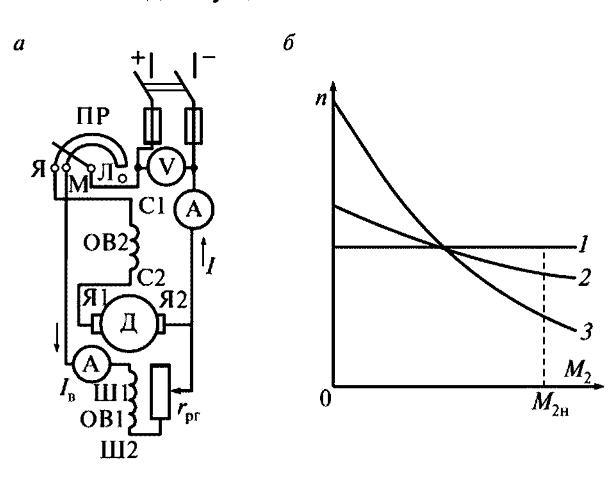


Рис. 2.43. Двигатель смешанного возбуждения и его характеристики:
а — схема двигателя; *б* — характеристики частоты вращения; *1* — встречное включение обмоток возбуждения; *2, 3* — согласное включение обмоток возбуждения

определяется в основном падением напряжения в цепи якоря (кривая *2*, рис. 2.43, *б*); при малых значениях магнитодвижущей силы характеристика частоты вращения приближается к характеристике двигателя последовательного возбуждения (кривая *3*).

Встречное включение обмоток применяют в тех случаях, когда необходимо получить неизменную частоту вращения (кривая *1*) или увеличение частоты вращения при увеличении нагрузки.

Двигатель смешанного возбуждения применяют в условиях, когда требуется большой пусковой момент, быстрое ускорение при пуске и допустимы значительные изменения частоты вращения при изменении нагрузки. Этот двигатель может работать вхолостую, так как магнитный поток параллельной обмотки возбуждения $Ф_1$ ограничивает частоту вращения двигателя в режиме холостого хода и устраняет опасность «разноса». Но двигатель смешанного возбуждения, имеющий на каждом полюсе по две обмотки возбуждения, более дорогостоящий по сравнению с двигателями рассмотренных выше типов, что несколько ограничивает его применение.

2.6. Тяговые машины ЭПС постоянного тока

Условия работы тяговых электродвигателей. Тяговые электродвигатели (ТЭД) предназначены для преобразования электрической энергии в механическую. Момент, созданный ТЭД, через зубчатую передачу и колесную пару преобразуется в силу тяги локомотива, которая реализуется в точке контакта колеса с рельсом. ТЭД расположены на тележках. Существуют три способа подвешивания ТЭД на тележках: опорно-осевое, опорно-центровое и опорно-рамное. В Российской Федерации опорно-центровое подвешивание не применяется. При опорно-осевом подвешивании ТЭД одной стороной прикреплен к раме тележки, а другой, противоположной, через подшипник опирается на ось колесной пары. В этом случае примерно половина массы двигателя является подрессоренной, а другая половина опирается на ось колесной пары и является неподрессоренной.

Удары от неровностей пути, воспринимаемые колесной парой, жестко передаются на ТЭД через моторно-осевые подшипники и зубчатое зацепление. В настоящее время в большинстве эксплуа-

тируемых грузовых локомотивов применяют опорно-осевое подвешивание.

При опорно-рамном подвешивании ТЭД прикреплен к раме тележки и его масса полностью подрессорена относительно колесной пары.

Этот вид подвешивания применяют на пассажирских локомотивах и МВПС, так как при скоростях движения 120 км/ч и выше опорно-осевое подвешивание из-за высоких динамических нагрузок не применяют. Опорно-рамное подвешивание более дорогое и его целесообразно применять только при высоких скоростях движения.

На ТЭД воздействуют вибрации, которые с повышением скорости движения возрастают. Ускорения вибраций для опорно-осевого подвешивания составляют (20–25)g, для опорно-рамного подвешивания — (3–5)g. Из технической механики известно, что произведение массы m тягового электродвигателя на ускорение a есть сила F:

для опорно-осевого подвешивания

$$F = ma = m(20 - 25)g; \qquad (2.55)$$

при опорно-рамном подвешивании

$$F = m(3 - 5)g. \qquad (2.56)$$

Сравнивая формулы (2.55) и (2.56), видим, что наибольшие динамические воздействия испытывает тяговый электродвигатель при опорно-осевом подвешивании.

Тяговые электродвигатели работают в условиях резких изменений нагрузок; частота вращения их якорей изменяется в широких пределах. Это обусловлено частыми пусками электровозов и тепловозов, преодолением ими подъемов, значительными колебаниями напряжения в контактной сети для ЭПС.

Основная часть Российской Федерации расположена в зоне умеренного климата (У); основная часть БАМа находится в зоне умеренно-холодного климата (УХЛ). Тяговые двигатели в исполнении У рассчитаны на работу при температуре окружающего воздуха от +40 до –50 °С, а при исполнении УХЛ от +40 до –60 °С. ГОСТ 15150—69 устанавливает, что тяговый электродвигатель в исполнении У и УХЛ можно эксплуатировать в теплых, влажных, жарких сухих и очень жарких сухих климатических районах с температурой воздуха выше +40 °С.

При высоких температурах происходит интенсивное старение изоляционных материалов, а также нарушается монолитность таких узлов тяговых электродвигателей, как коллекторы, моноблочные полюсные системы и др. В то же время низкие температуры увеличивают жесткость пути и, как следствие, происходит увеличение динамического воздействия, особенно при опорно-осевом подвешивании.

Высокая влажность воздуха уменьшает сопротивление изоляции, что может привести к ее сбою и выходу из строя тягового электродвигателя. Резкие перепады температуры с высокой влажностью воздуха могут привести к обледенению. Коллектор покрывается инеем, что вызывает сильное искрение. Кроме того, высокая влажность воздуха вызывает ускоренную коррозию деталей электродвигателя, выполненных из металлов.

Пыль, содержащаяся в воздухе, осаждаясь на изолированных поверхностях тяговых электродвигателей, снижает сопротивление изоляции, а также ее теплопроводность, что может привести к перегреву обмоток. Пыль оказывает абразивное воздействие на подвижные детали тягового электродвигателя и тем самым вызывает их повышенный износ, а также негативно влияет на изоляционные и антикоррозионные поверхности, ускоряя их старение. Отрицательное действие пыли усугубляется при попадании в ТЭД капельной влаги, снега, а также при высокой влажности.

В соответствии с ПТЭ железных дорог РФ напряжение в контактной сети может колебаться в широких пределах. Для ЭПС постоянного тока номинальное напряжение в контактной сети составляет 3000 В; оно может увеличиваться до 3850 В и снижаться до 2200 В. В то же время при рекуперативном торможении напряжение может подниматься до 4000 В. В контактной сети переменного тока номинальное напряжение составляет 25 000 В. Оно может увеличиваться до 29 000 В и уменьшаться до 19 000 В. При таких перепадах питающего напряжения тяговый электродвигатель ЭПС должен надежно работать.

Характеристики ТЭД постоянного тока. Как указывалось выше, большинство ТЭД имеют последовательное возбуждение. Двигатели параллельного возбуждения имеют более жесткие характеристики, поэтому их применяют в тех случаях, когда требуется постоянство частоты вращения.

Двигатели последовательного и смешанного возбуждения имеют более мягкие характеристики. Потребляемая ими мощность из сети при колебаниях момента меньше, чем у двигателей параллельного возбуждения. Характеристика, близкая к гиперболе, обеспечивает постоянство мощности.

Отличие между тепловозными и электровозными ТЭД состоит в том, что мощность источника питания электровоза практически неограниченна, а на тепловозах с ростом скорости v и тока I напряжение уменьшается. Ограничение I_{min} связано с увеличением насыщения магнитной цепи генератора, I_{max} — с ограниченной мощностью источника питания.

Поэтому на электровозах обеспечивается бóльшая сила тяги и мощность при высоких скоростях движения.

Коллекторные ТЭД локомотивов имеют много общего, так как принцип действия их работы одинаковый. На устройство ТЭД оказывают влияние способ их подвешивания, тип передачи вращающего момента от вала ТЭД к оси колесной пары, число полюсов, а также наличие или отсутствие компенсационной обмотки. Принцип действия двигателя последовательного возбуждения, а также способы регулирования частоты вращения, рассмотрены ранее (см. п. 2.5).

Остов ТЭД является частью магнитной цепи машины, в то же время он является корпусом. Остов, как правило, отливают из стали или, как остов ТЭД НБ-507, выполняют сварным.

Как корпус, остов воспринимает механические нагрузки от неровностей пути, от вращающего момента, от распорных усилий в зубчатой передаче, а как магнитопровод — должен хорошо проводить магнитный поток.

После литья в остове не должно быть раковин, трещин, окалины и других дефектов. Форма остова определяется количеством полюсов и видом привода. Если ТЭД имеет четыре главных полюса, то остов обычно имеет восьмигранную форму, близкую к квадрату (рис. 2.44, *а*). Если число полюсов шесть и более, то остов имеет цилиндрическую форму (рис. 2.44, *б*).

Шестиполюсное исполнение ТЭД имеет ряд преимуществ по сравнению с четырехполюсным. Во-первых, полюсное деление и магнитный поток полюса в 1,5 раза меньше, чем в четырехполюс-

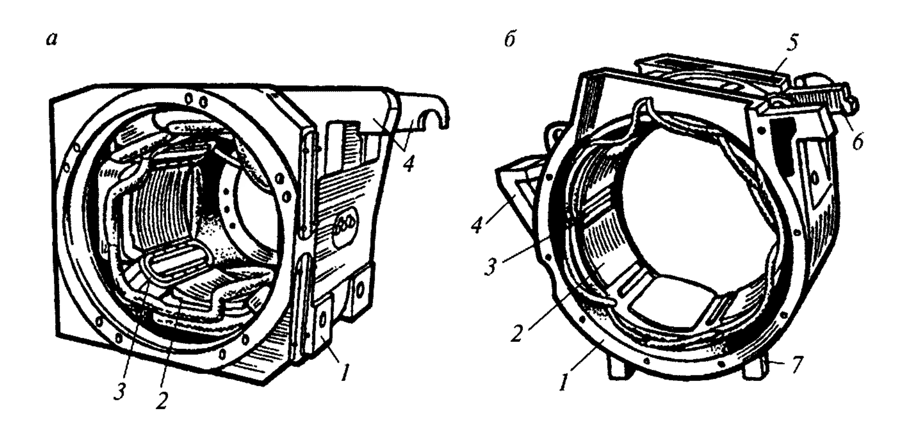


Рис. 2.44. Остовы тяговых электродвигателей для рамного подвешивания с восьмигранной (*а*) и цилиндрической (*б*) формой:
1 — остов; *2*, *3* — главный и добавочный полюсы; *4*, *6* — кронштейны; *5* — прилив для крепления вентиляционной коробки; *7* — выступ для установки двигателя на полу

ном ТЭД, благодаря чему во столько же раз уменьшается толщина остова, а следовательно, и его масса.

Во-вторых, с уменьшением полюсного деления уменьшаются ширина шины обмотки якоря, вылеты проводников и ток, проходящий по щеткодержателям. Это позволяет уменьшить рабочую длину коллектора и во столько же раз увеличить длину сердечника якоря. Обычно эта величина составляет 10—20 мм. Благодаря увеличению длины якоря можно увеличить мощность ТЭД при тех же габаритных размерах.

В-третьих, при уменьшении в 1,5 раза полюсного деления во столько же раз уменьшается МДС якоря по поперечной оси, а следовательно, и воздушный зазор под главными и добавочными полюсами. Это позволяет снизить массу катушек примерно на 10 %. Также меньше толщина корпусной изоляции, что позволяет лучше отводить тепло, а следовательно, можно увеличить ток. А увеличение тока — это увеличение мощности ТЭД.

На поверхности остова находятся приливы для крепления моторно-осевых подшипников при опорно-осевом подвешивании. Со стороны, противоположной моторно-осевым подшипникам, находится кронштейн для крепления ТЭД к раме тележки.

При опорно-рамном подвешивании (см. рис. 2.44, *а*) с двух сторон находятся кронштейны *4* для подвешивания на раме тележки. На корпусе имеются также приливы с резьбой для крепления кожухов зубчатой передачи.

В торцевых сторонах остова имеются отверстия — раструбы — для подвода и выхода охлаждающего воздуха, который чаще всего подается со стороны коллектора, а иногда с противоположной стороны.

Для осмотра щеток и коллектора в остове со стороны коллектора предусматривают два (иногда три) коллекторных люка, закрываемых крышками. Крышки изготовляют из стали Ст2 или отливают из легких сплавов. Для увеличения надколлекторного пространства крышки люков выгибают по дуге. Крышка верхнего коллекторного люка имеет уплотняющие войлочные прокладки, благодаря которым предотвращается попадание внутрь двигателя влаги, пыли и снега.

Главные полюсы изготавливают из отдельных стальных листов толщиной 1,5—2 мм (рис. 2.45). Собранные листы сердечника спрессовывают усилием около 100 кН и закрепляют четырьмя-шестью заклепками. Для крепления сердечника к остову в середине листа выштампованы отверстия, в которые запрессовывают один или два стальных стержня. В стержне сделаны резьбовые отверстия, посредством которых образуется болтовое крепление сердечника с остовом. Крепящие болты должны быть ввернуты в стержень на глубину, не меньшую 1,25 их диаметра.

В наконечниках главных полюсов грузовых электровозов выполняют пазы, куда укладывают компенсационную обмотку. Маг-

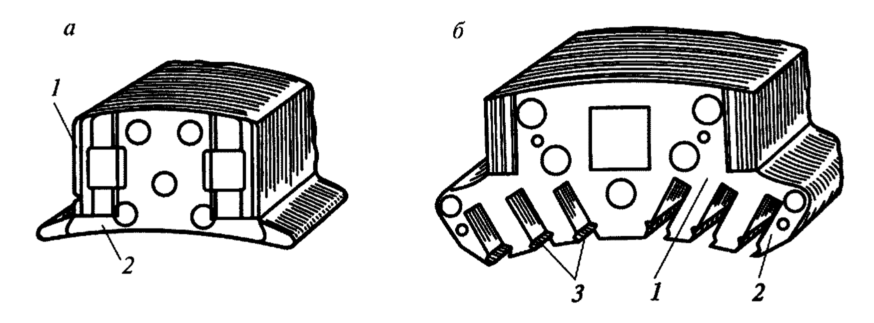


Рис. 2.45. Сердечники главных полюсов:
а — без компенсационной обмотки; *б* — с пазами для компенсационной обмотки: *1* — сердечник главного полюса; *2* — полюсный наконечник; *3* — пазы

нитный поток компенсационной обмотки направлен встречно магнитному потоку реакции якоря и компенсирует его. Применение компенсационной обмотки оправдано для двигателей мощностью $P_{ном}$ > 700 кВт, а также при соотношении частот вращения $n_{max}/n_{ном} > 2u$, среднем напряжении между соседними коллекторными пластинами u > 17–18 В.

Сердечники добавочных полюсов тепловозов, электровозов и электропоездов постоянного тока выполняют сплошными из стали в виде отливок или обработанных поковок. В ТЭД пульсирующего тока сердечники добавочных полюсов выполнены шихтованными (НБ-418К6, НБ-514, НБ-520).

Обмотки возбуждения главных и добавочных полюсов наматывают из шинной меди (рис. 2.46). При цилиндрическом остове наиболее часто катушки наматывают на ребро. Витковую изоляцию катушек обычно выполняют из асбестовой бумаги, а между слоями у двухслойных катушек устанавливают изоляционные прокладки из миканита. Корпусная изоляция класса *B* обычно выполняется из асбестовой или киперной ленты, а класса H — из стеклослюдинитовой. Толщина корпусной изоляции определяется напряжением на коллекторе и электрической прочностью примененного изоляционного материала. Но чем больше толщина изоляции, тем хуже ее теплопроводность. Обмотки будут нагреваться до более высокой температуры, плохо отдавая излишек тепла стальному сердечнику, который лучше охлаждается потоком воздуха.

Если выполняют изоляцию по типу «Монолит 2» класса F, то для корпусной изоляции применяют стеклослюдинитовую ленту ЛСКН толщиной 0,13 мм, а для покровной — стеклоленту также

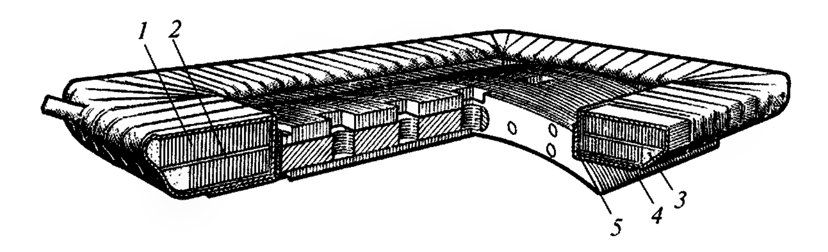


Рис. 2.46. Главный полюс с обмоткой возбуждения:
1 — обмотка возбуждения; *2* — прокладка из миканита; *3* — специальная замазка; *4* — общая изоляция; *5* — пружинный фланец

толщиной 0,13 мм, наматывая ее одним слоем в полуперекрышу. В качестве витковой изоляции используют асбест толщиной 0,6 мм. После сборки катушек их пропитывают в компаунде «Монолит 2».

Монолитная изоляция имеет ряд преимуществ по сравнению со стекломикалентной. Во-первых, пробивное напряжение выше в среднем в 2 раза и составляет 16,1 против 8,3; во-вторых, теплопроводность ее изоляции выше на 25—30 %; в-третьих, коэффициент линейного расширения изоляции и меди примерно одинаков, что повышает ее надежность. Однако в эксплуатации стекломиканитовая изоляция усыхает, что приводит к нарушению плотности крепления.

Изоляция компенсационной обмотки такая же, как изоляция обмотки главных полюсов. Катушку крепят в пазах текстолитовыми клиньями.

Катушка добавочного полюса удерживается на сердечнике при помощи латунных наконечников (угольников). Намотку катушек добавочных полюсов выполняют или плашмя, или на ребро. В качестве межвитковой изоляции применяют асбест, электронит, пленкосинтокартон толщиной 0,4—0,6 мм. Корпусная изоляция чаще всего выполняется по классу нагревостойкости F из стеклослюдинитовой ленты толщиной 0,09—0,11 мм, пропитанной или непропитанной. Если применяется непропитанная лента, то обязательно пропитывают катушки в эпоксидном компаунде или другом компаунде с последующей полимеризацией. Для защиты корпусной изоляции от механических повреждений поверх нее наматывают стеклоленту ЛЭС толщиной 0,5 мм. Если катушка укладывается в обойму, то внутренние поверхности обоймы промазываются лаком или компаундом, а затем катушка должна выпекаться пропусканием тока по виткам обмотки. Обычно под покровную изоляцию укладывается пленка из фторопласта, обеспечивающая возможность демонтажа при ремонте.

Между сердечником добавочного полюса и остовом устанавливают диамагнитную прокладку из латуни, алюминия или текстолита, уменьшающего магнитное насыщение.

Якорь ТЭД (рис. 2.47) состоит из вала *8*, сердечника якоря *6*, нажимных шайб *3*, барабанной втулки *7*, обмотки якоря *10*, коллектора *5*. Вал ТЭД изготовляют из стали марки 20ХН3А с допустимым напряжением 200 кПа. Он подвергается действию крутящих моментов, вызывающих появление значительных касательных на-

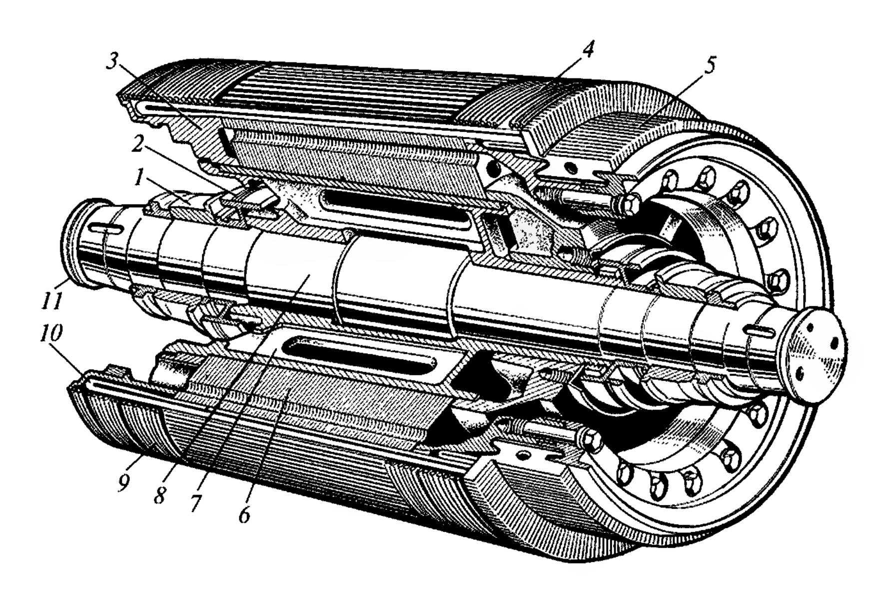


Рис. 2.47. Якорь:

1 — подшипниковое кольцо; *2* — лабиринтное кольцо; *3* — задняя нажимная шайба; *4*, *9* — передняя и задняя лобовые части; *5* — коллектор; *6* — сердечник якоря; *7* — барабанная втулка; *8* — вал; *10* — обмотка якоря; *11* — гайка

пряжений. На вал действуют силы реакции зубчатой передачи, а также масса самого якоря. Во время движения поезда появляются динамические воздействия от неровностей пути, от толчков в период пуска и торможения, от ударной нагрузки при выходе колесной пары из состояния боксования.

Для уменьшения концентрации напряжений валы проектируют с галтелями, т.е. с плавными переходами от одного диаметра вала к другому. Пазы для шпонок делают минимальной глубины и протяженности.

Вал обрабатывают по второму классу точности, а затем шлифуют. Особое внимание уделяют обработке переходных галтелей, которые полируют до зеркального блеска.

На вал напрессовывают детали якоря. Благодаря втулке можно производить замену вала без полной разборки якоря. Втулку насаживают на вал с натягом 0,13—0,16 мм.

Со стороны, противоположной коллектору, на втулку напрессовывают заднюю нажимную шайбу *3*. Ее изготовляют из стали мар-

ки 25Л-1. Обычно задние нажимные шайбы изготавливают со специальными фланцами, которые направляют охлаждающий воздух, поступающий из каналов якоря, а также защищают головки лобовых частей обмотки якоря от повреждений. Иногда задние нажимные шайбы выполняют без фланцев. В этом случае улучшается теплоотдача задней лобовой части обмотки якоря.

Передняя нажимная шайба якоря напрессовывается со стороны коллектора. Она имеет бóльшую посадочную поверхность для напрессовки на нее коллектора.

При отсутствии втулки, нажимные шайбы насаживают непосредственно на вал двигателя.

Сердечники якорей изготавливают из отдельных пластин электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Листы покрывают с обеих сторон пленкой бакелитового лака толщиной 0,012—0,014 мм или жидким стеклом. В сердечнике делают пазы для укладки обмотки якоря.

Внутри сердечника якоря делают вентиляционные каналы, которые обычно размещают в шахматном порядке по окружности якоря в два или три ряда.

Обмотку якоря выполняют простой петлевой или простой волновой. Простые волновые обмотки наиболее просты в изготовлении, так как они не требуют уравнительных соединений. Однако простые волновые обмотки применяют в двигателях, если ток якоря не превышает 350—400 А. С увеличением тока якоря ухудшаются потенциальные условия из-за увеличения реактивной ЭДС, что ухудшает коммутацию. Вследствие этого при токах, превышающих 300—350 А, применяют простые петлевые обмотки. В простой петлевой обмотке снижаются напряжения между соседними коллекторными пластинами (на 12 В) и реактивная ЭДС (на 0,5 В), что облегчает условия коммутации.

Обмотку изготавливают из отдельных катушек, выполненных из шинной меди. В пазах якоря обмотку закрепляют текстолитовыми клиньями, а лобовые части крепят проволочными бандажами или стеклобандажами. Проволочные бандажи изготавливают из луженой стальной проволоки, которую наматывают в два слоя, скрепляют вспомогательными жестяными скобами и пропаивают оловянисто-свинцовым припоем ПОС-40. Однако бандажи из стеклоленты обладают более высокой прочностью.

Уравнительные соединения чаще всего устанавливают со стороны коллектора, но иногда и с противоположной стороны. Если уравнительные соединения расположены со стороны коллектора, то их подсоединяют к коллекторным пластинам, к тем же шлицам «петушков», в которые вводятся и концы проводников якоря. Если же уравнительные соединения находятся с противоположной стороны, то их располагают под задней нажимной шайбой и подключают к головкам секции скобами.

***Коллектор** 5* крепят на передней нажимной шайбе. Его диаметр $D_к$ зависит от максимально допустимой скорости $V_{к\,max}$, которая по условиям надежности токосъема равна 60 м/с, а также от максимальных величин механических напряжений:

$$Q < 60\, V_{к\,max}/n_{max}. \quad (2.57)$$

Число коллекторных пластин K выбирается исходя из допустимых потенциальных условий на коллекторе:

$$K > 2\,p\,U/U_{мл\,ср},$$

где $U_{мл\,ср}$ — среднее напряжение между пластинами коллектора, равное обычно 17—18 В.

Диаметр коллектора должен быть меньше диаметра якоря

$$D = (0{,}7\text{—}0{,}8)\, D_а. \quad (2.58)$$

Толщина прокладки между коллекторными пластинами обычно равна 1,0—1,3 мм.

Для повышения износоустойчивости коллекторные пластины изготавливают из меди с присадкой серебра или кадмия. С нижней стороны «ласточкин хвост» коллекторных пластин изолирован от стальных конусов миканитовыми манжетами. Болты, посредством которых скрепляются элементы коллектора, изготовливаются из высокоуглеродистой или легированной стали.

Внутренняя воздушная изоляционная камера, образованная нажимными шайбами, конусом и коллекторными пластинами, должна быть герметичной, чтобы не попадала влага и не возникал электрический пробой.

Коллекторные пластины в сечении имеют клиновидную форму, а миканитовые сегменты — прямоугольную, поэтому в собранном состоянии они образуют цилиндр. Каждая пластина имеет с одной стороны «петушок» для соединения с обмоткой якоря и уравнителями. При износе коллектора миканитовые пластины могут выступать над

медными пластинами. Тогда щетка при вращении якоря будет отрываться и тянуть электрическую дугу, разрушающую коллектор. Чтобы этого не произошло, коллектор должен быть продорожен, т.е. специальным резцом удаляют миканит на глубину до 1,5 мм. После этого на коллекторных пластинах снимают фаску. С одной стороны, это снизит опасность возникновения кругового огня, а с другой стороны, миканит не будет изнашивать более мягкие графитовые щетки.

Щетки, щеткодержатели и траверсы. При $2p > 2$ все щеткодержатели со щетками трудно установить на геометрической нейтрали. В этом случае щеткодержатели крепят на траверсе.

Траверса предназначена для установки кронштейнов щеткодержателей и для подведения их к смотровым люкам. На наружной поверхности траверсы расположен венец зубчатого колеса, находящийся в зацеплении с небольшим зубчатым колесом, которое можно вращать. Одновременно с траверсой будут поворачиваться все щеткодержатели, и с одного смотрового люка можно все их осмотреть. Траверса, как правило, разрезная. В рабочем положении траверса разжата и точно фиксирует щеткодержатели.

В качестве примера рассмотрим траверсу тягового электродвигателя ДТК-800КЭ электровоза ЭП2К (рис. 2.48). На траверсе закреплены шесть кронштейнов *3* с изоляционными пальцами *2*, шесть щеткодержателей *4*, соединенных между собой шинами *5*. Траверса крепится одним фиксирующим и двумя стопорными устройствами, а также разжимным устройством *6*.

Благодаря *стопорному устройству* (рис. 2.49) траверса со щеткодержателями не может повернуться во время движения локомотива. На болту *1* держится накладка *2* и обойма *3*. Накладка при вращении болта входит в обойму и прижимает траверсу *4* к подшипниковому щиту *5*.

Устройство фиксации траверсы (рис. 2.50) позволяет более точно устанавливать на геометрической нейтрали траверсу по совпадению рисок, нанесенных на остове и траверсе в районе разжимного устройства. Оно состоит из накладки *1* с пазом для входа фиксатора *2*. Накладка крепится к траверсе двумя болтами через продольные пазы.

Поворотный механизм траверсы (рис. 2.51) обеспечивает ее поворот для осмотра всех щеткодержателей из одного смотрового люка остова *4*. Шестерня *1*, напрессованная на валик *3*, находится в зацеплении с зубьями траверсы *2*. Валик имеет квадратную головку.

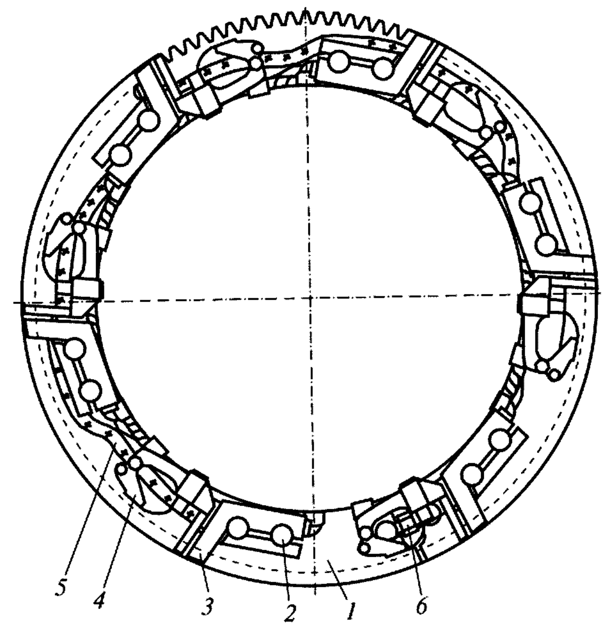


Рис. 2.48. Траверса:
1 — корпус; *2* — изоляционный палец; *3* — кронштейн; *4* — щеткодержатель; *5* — шина; *6* — разжимное устройство

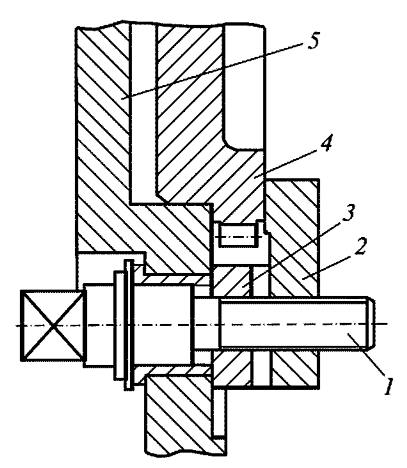


Рис. 2.49. Стопорное устройство траверсы тягового электродвигателя ДТК-800КЭ

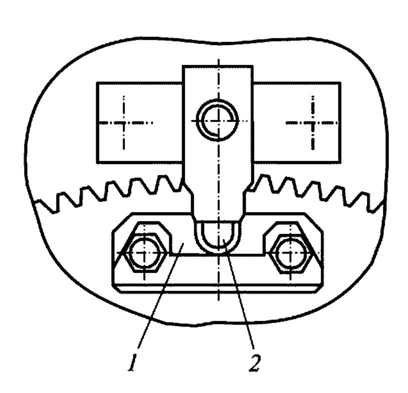


Рис. 2.50. Устройство фиксации траверсы электродвигателя ДТК-800КЭ

При вращении валика шестерня поворачивает траверсу.

Разжимное устройство (рис. 2.52) состоит из двух шарниров *1*, которые закреплены гайками *2* с шайбами *3* на траверсе. Один шарнир имеет отверстие с правой резьбой, другой — с левой. В шарниры ввинчена шпилька *4* с шестигранником для ее захвата ключом. При вращении шпильки в ту или иную сторону происходит разжатие или сжатие траверсы *5*. В рабочем положении траверса должна быть разжата.

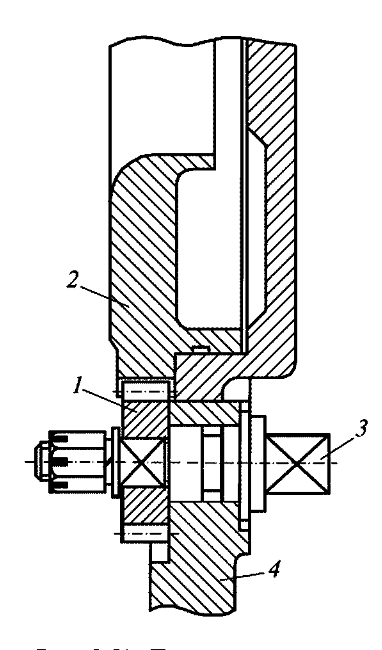


Рис. 2.51. Поворотный механизм траверсы электродвигателя ДТК-800КЭ

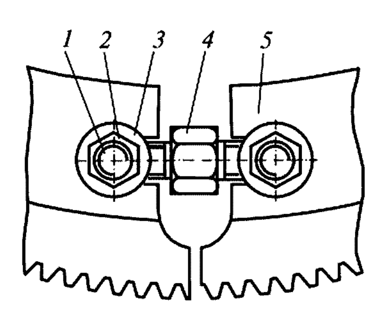


Рис. 2.52. Разжимное устройство траверсы электродвигателя ДТК-800КЭ

Щеткодержатели. Основными требованиями, предъявляемыми к щеткодержателям тяговых машин, являются:

– обеспечение равномерного и постоянного нажатия на щетку и правильной установки щеток относительно коллектора;

– высокая механическая прочность деталей, устойчивость против вибраций и толчков;

– высокая электрическая прочность изоляционных деталей;

– износоустойчивость и обеспечение легкой смены нормально изношенных деталей;

– доступность для обслуживания и возможность регулирования нажатия на щетку по мере их износа.

Щеткодержатели состоят из корпуса и нажимных устройств. Кронштейн (рис. 2.53, *а*) выполнен из стали и состоит из двух половин *1* и *2*, скрепленных болтом. Каждая половина кронштейна имеет две выточки для охвата пальцев *3* и *4*, представляющих собой стержни из стали 45 переменного сечения, опрессованные прессмассой АГ-4.

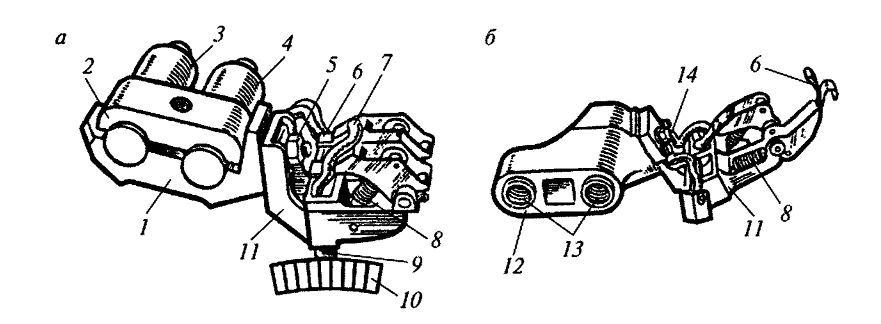


Рис. 2.53. Щеткодержатели тяговых электродвигателей ТЛ-2К, НБ-418К6 (*а*) и РТ-51Д (*б*):

1, *2* — верхняя и нижняя половины кронштейна; *3*, *4* — пальцы кронштейна; *5* — гайка; *6* — нажимной палец; *7* — гибкий шунт; *8* — цилиндрическая пружина; *9* — щетка; *10* — коллекторные пластины; *11* — корпус щеткодержателя; *12* — кронштейн из стеклопластика; *13* — стальные пальцы с резьбовыми отверстиями для крепления кронштейна к остову; *14* — болт

Пальцы имеют фарфоровые изоляторы с глянцевой поверхностью, благодаря чему уменьшается скопление пыли и предотвращается электрическое перекрытие с корпуса кронштейна на остов. Два пальца исключают возможность поворота кронштейна относительно остова.

В ТЭД электропоездов щеткодержатели выполнены из пластмассы марки АГ-4В.

Подшипниковые щиты. По месту расположения в машине различают передние подшипниковые щиты (со стороны коллектора) и задние (с противоположной стороны). Один из подшипниковых щитов делают бóльших размеров, для того чтобы можно было демонтировать якорь при разборке машины. Поэтому этот подшипниковый щит иногда называют большим подшипниковым щитом, а противоположный — соответственно малым (рис. 2.54).

В остов подшипниковые щиты запрессовывают с натягом и закрепляют болтами. Под головки болтов устанавливают пружинные шайбы. В фланцах имеются четыре резьбовых отверстия для выжимных болтов, посредством которых выпрессовывают щиты из остова при разборке электродвигателя.

В малом подшипниковым щите (рис. 2.54, *а*) выполнен бурт с поверхностью для подвижной посадки траверсы и два люка для

осмотра щеткодержателей, коллектора и состояния крепления шинных соединений.

В тяговых электродвигателях НБ-418К6, НБ-514, ТЛ-2К, ЭД-118 и других смотровые люки выполнены на остове.

В большом подшипниковом щите (рис. 2.54, *б*) сделаны люки для выхода вентилирующего воздуха из тягового электродвигателя.

С внутренней стороны подшипниковые камеры имеют комбинированные лабиринтно-канавочные уплотнения, которые через дренажные отверстия сообщаются с атмосферой. Благодаря этому происходит выравнивание давления в подшипниковых камерах до уровня атмосферного, что исключает выдавливание смазки из них

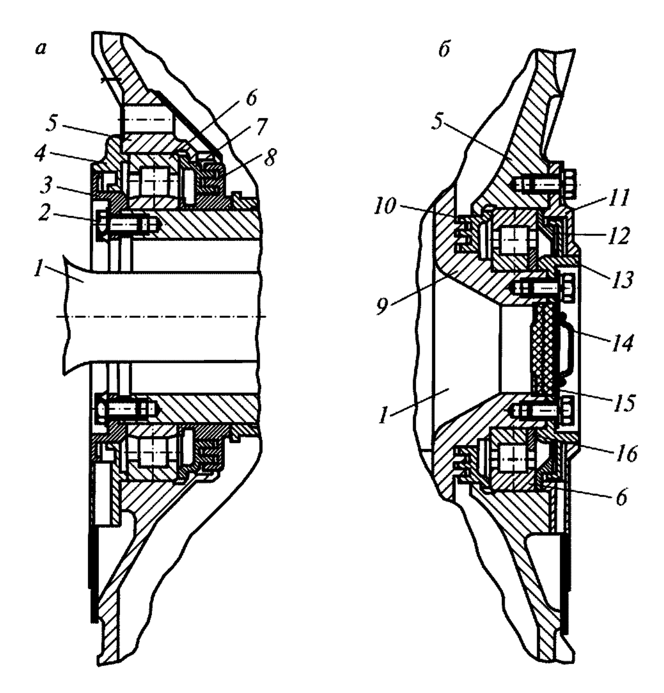


Рис. 2.54. Подшипниковые щиты электродвигателя НБ-520В:
а — малый подшипниковый щит, *б* — большой подшипниковый щит:
1 — вал; *2* — болт; *3* — упорное кольцо; *4, 7* — наружная и внутренняя крышки подшипника; *5* — корпус; *6* — подшипник; *8* — втулка; *9* — втулка; *10* — внутреннее кольцо; *11* — крышка подшипника; *12* — наружное кольцо; *13* — нажимное кольцо; *14* — упор; *15* — манжета; *16* — регулировочная прокладка

разностью давлений, возникающих в работающем тяговом электродвигателе. С внутренней стороны уплотнения образованы крышками *4*, *7* и кольцами *10*, *13* соответственно.

Отработанная смазка удаляется при каждом ее добавлении в подшипники.

2.7. Конструктивные исполнения тяговых двигателей

Тяговые электродвигатели НБ-418К6 применяют на грузовых электровозах постоянного тока ВЛ80^{К}, ВЛ80^{Т}, ВЛ80^{Р}, ВЛ80^{С}.

Технические характеристики двигателя НБ-418К6

Напряжение на зажимах двигателя, В:	
номинальное	950
максимальное	1180
Максимальная частота вращения, об/мин	2040
Число пар полюсов, шт.	3
Коэффициент возбуждения, %:	
номинальный	96
минимальный	43
Расход охлаждающего воздуха, м^3/мин	105
Класс изоляции по нагревостойкости:	
катушек главных полюсов и добавочных полюсов	H
якоря и компенсационной обмотки	F
Сопротивление, Ом:	
катушек главных полюсов	0,008
катушек добавочных полюсов и компенсационной обмотки	0,012
обмотки якоря	0,011
Масса, кг	4350
Мощность, кВт	$\frac{790}{740}$
Ток якоря, А	$\frac{880}{820}$
Ток возбуждения, А	$\frac{845}{785}$
Частота вращения, об/мин	$\frac{890}{915}$

Примечание. В числителе — при часовом режиме работы, в знаменателе — при длительном.

Тяговые электродвигатели (рис. 2.55) выполнены шестиполюсными с опорно-осевым подвешиванием. Для компенсации действия

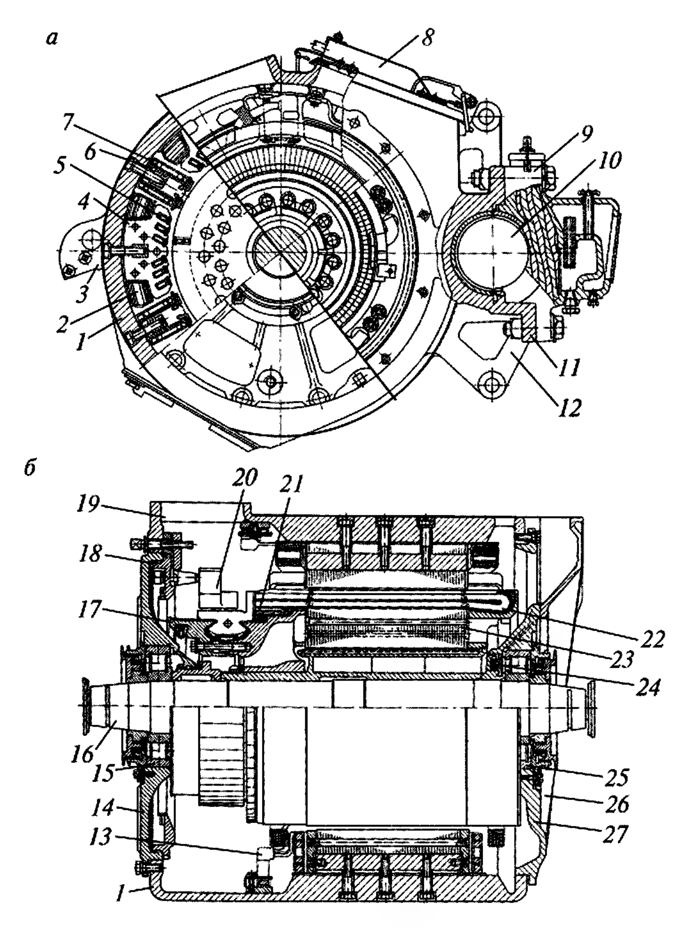


Рис. 2.55. Поперечный (*а*) и продольный (*б*) разрез тягового электродвигателя НБ-418К6:

1 — остов; *2, 7* — катушки главного и добавочного полюсов; *3* — кронштейн маятникового подвешивания; *4* — сердечник главного полюса; *5* — компенсационная обмотка; *6* — сердечник добавочного полюса; *8* — коробка выводов; *9* — «шапка» моторно-осевого подшипника; *10* — ось колесной пары; *11* — фланец горловины под моторно-осевые подшипники; *12* — кронштейн подвешивания двигателя; *13* — межкатушечное соединение; *14, 27* — передний и западный подшипниковые щиты; *15, 25* — передний и задний подшипники; *16* — вал; *17* — коллектор; *18* — поворотная траверса; *19* — вентиляционный раструб; *20* — щеткодержатель; *21* — уравнитель; *22* — катушка обмотки якоря; *23* — сердечник якоря; *24* — лабиринтное уплотнение; *26* — раструб для выхода из машины вентилируемого воздуха

реакции якоря главные полюсы имеют компенсационную обмотку *5*. ТЭД получает питание от выпрямителя, т.е. питается пульсирующим током.

Однако пульсирующий ток можно разложить на две составляющие — постоянную I_d и переменную $I_{пер}$. Переменная составляющая тока создает переменную составляющую магнитного потока, которая индуктирует в обмотке якоря трансформаторную ЭДС, значительно ухудшающую условия коммутации. Трансформаторная ЭДС направлена под углом к реактивной ЭДС, поэтому она не компенсируется магнитным потоком добавочных полюсов.

Для уменьшения трансформаторной ЭДС применяют сглаживающие реакторы *L* и параллельно обмотке возбуждения главных полюсов включают активное сопротивление R.

Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечники добавочных полюсов выполняют шихтованными.

С противоположной стороны от моторно-осевых подшипников на остове расположены прилив *2* и съемный кронштейн *3* для подвески двигателя, а также предохранительные приливы. В двигателе предусмотрены два смотровых люка (один сверху и один снизу), предназначенные для осмотра и ремонта коллекторно-щеточного узла. Люки плотно закрыты крышками.

В верхней части двигателя со стороны коллектора, расположен раструб *19* для входа вентилируемого воздуха. В двигателе воздух движется двумя параллельными потоками. Один поток воздуха охлаждает внешнюю поверхность якоря и катушки полюсов, а другой — проходит по вентиляционным каналам якоря. Нагретый воздух выходит из двигателя со стороны, противоположной коллектору через выходной люк.

К внутренней стороне остова прикреплены болтами шесть главных полюсов *4* с катушками возбуждения *2* и шесть добавочных полюсов *6* с катушками возбуждения *7*, поворотная траверса *18* с шестью щеткодержателями *20*. Сердечники главных полюсов выполнены из отдельных спрессованных и стянутых заклепками листов электротехнической стали. Каждый сердечник прикреплен к остову тремя болтами. Между сердечником и остовом установлено по одной стальной прокладке толщиной 0,5 мм. Катушка главного полюса намотана медной лентой на ребро. Витки катушки изолированы асбестовой бумагой.

В наконечниках главных полюсов сделаны пазы, куда уложена компенсационная обмотка. Изоляция витков компенсационной обмотки состоит из одного слоя микаленты, намотанной в полуперекрышу. Корпусная изоляция состоит из девяти слоев микаленты, также намотанной в полуперекрышу, а покровная — из одного слоя стеклоленты толщиной 0,2 мм. В пазах компенсационную обмотку крепят текстолитовыми клиньями.

Сердечники добавочных полюсов выполнены также из листов электротехнической стали и прикреплены к остову болтами. Между остовом и сердечниками добавочных полюсов установлены прокладки из латуни толщиной 7 мм. Для предотвращения сползания катушек на якорь к наконечнику заклепками прикреплены латунные угольники. Катушки добавочных полюсов намотаны на ребро из меди прямоугольного сечения и имеют по десять витков каждая.

Межвитковая изоляция состоит из асбестовой бумаги, а корпусная и покровная изоляция такая же, как и у катушек главных полюсов.

На вал *16* якоря напрессована барабанная втулка коробчатой формы, на которой собран сердечник якоря, состоящий из спрессованных листов электротехнической стали. В сжатом состоянии листы сердечника якоря удерживаются нажимными шайбами — передней и задней. В сердечнике сделаны пазы, куда уложена простая петлевая обмотка якоря *22*.

Корпусная изоляция пазовой части катушки состоит из шести слоев стеклослюдинитовой ленты, толщиной 0,11 мм, уложенной в полуперекрышу, а покровная изоляция — из одного слоя стеклоленты. Обмотка якоря закреплена в пазах текстолитовыми клиньями, а на лобовые части наложен бандаж из стеклоленты. На передней нажимной шайбе смонтирован коллектор *17*. Коллекторные пластины изолированы друг от друга миканитовыми прокладками, а от нажимной шайбы и нажимного конуса — миканитовыми манжетами и миканитовым цилиндром.

Болты стягивают стальные конуса, удерживая коллектор в собранном состоянии. Уравнительные соединения *21* уложены под передней лобовой частью обмотки якоря.

Выступающие концы вала *16* двигателя имеют конусность для посадки с натягом зубчатых шестерен. Дополнительно шестерни крепятся гайками.

В подшипниковых щитах *14* и *27* установлены роликовые подшипники *15* и *25*. Для предотвращения утечки масла подшипниковые камеры имеют лабиринтные уплотнения горизонтального и вертикального типов. Подшипниковые щиты запрессованы в горловины остова и закреплены болтами.

Особенности конструкции тягового электродвигателя пульсирующего тока НБ-514А. Этот тяговый электродвигатель применяется на электровозах переменного тока ВЛ-80^{с} с 1989 г., а также на электровозах ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К, и практически унифицирован с тяговым электродвигателем НБ-418К6, но в отличие от него лобовые части обмотки якоря двигателя НБ-514А выполнены открытыми, катушки добавочных полюсов размещены ближе к якорю, катушки главных полюсов выполнены моноблочными, уменьшен воздушный зазор под главными полюсами, для якорной обмотки применена изоляция ЛСЭК-5.

Технические характеристики двигателя НБ-514А

Напряжение на зажимах двигателя, В	1000
Расход охлаждающего воздуха, м^3/мин	80
Масса, кг	4282
Мощность, кВт:	
при часовом режиме	830
при длительном режиме	775
Ток возбуждения, А:	
при часовом режиме	887
при длительном режиме	825

Тяговый электродвигатель **ДТК-800КЭ** применяют на пассажирских электровозах ЭП-2К в режиме тяги и режиме электрического торможения. Тяговый привод третьего класса, т.е. у тягового электродвигателя и редуктора опорно-рамное подвешивание. Зубчатая передача односторонняя.

Технические характеристики тягового электродвигателя ДТК-800КЭ приведены в табл. 2.2.

Тяговый электродвигатель (рис. 2.56) состоит из остова *21*, главных полюсов *22* с обмотками возбуждения *25*, добавочных полюсов *20* с обмотками возбуждения *19*, якоря *35* с коллектором *14*, щеткодержателей *18*, подшипниковых щитов *12* и *28*. К остову тягового электродвигателя прикреплен кожух тягового редуктора.

Таблица 2.2

Технические характеристики тягового электродвигателя ДТК-800КЭ

Наименование параметров	Режим работы	
	часовой	продолжи-тельный
Мощность, кВт	825 825	735
Напряжение на коллекторе, В	3000/2	
Ток якоря, А	585	520
Частота вращения, об/мин	975	1000
Расход вентилируемого воздуха, м^3/мин, не менее	80	
Степень возбуждения, %	100	
Класс изоляции обмоток: компенсационной, главного и добавочного полюсов, якоря	Н	
Масса, кг	3850	
Испытательное напряжение изоляции относительно корпуса, В	4000	

Остов — стальной, сварной. К нему с внутренней стороны болтами прикреплены шесть главных *22* и шесть добавочных *20* полюсов. К торцам остова прикреплены также болтами подшипниковые щиты, предназначенные для размещения роликовых подшипников *10* и *31*. Со стороны коллектора в остове находится люк для подачи вентилирующего воздуха и два коллекторных люка для осмотра и ремонта коллекторно-щеточного узла. В коллекторных люках предусмотрены уплотняющие резиновые прокладки. С наружной стороны остова имеются приливы для крепления цапфы привода и электродвигателя к раме тележки, рым-болты для транспортировки и кантования остова. Для слива конденсата в нижней части остова имеется отверстие диаметром 20 мм.

Главные полюсы состоят из сердечника и обмоток возбуждения. Обмотки возбуждения выполнены в виде катушек, надетых на сердечники главных полюсов. Сердечники выполнены из отдельных спрессованных и скрепленных заклепками листов электротехнической стали марки 2212 толщиной 0,5 мм. Для крепления полюса к остову в сердечник запрессованы два стальных стержня *23* с резьбовыми отверстиями для болтов крепления. В наконечниках сердечников выполнены восемь пазов, куда укладывают компенсационную обмотку *26*.

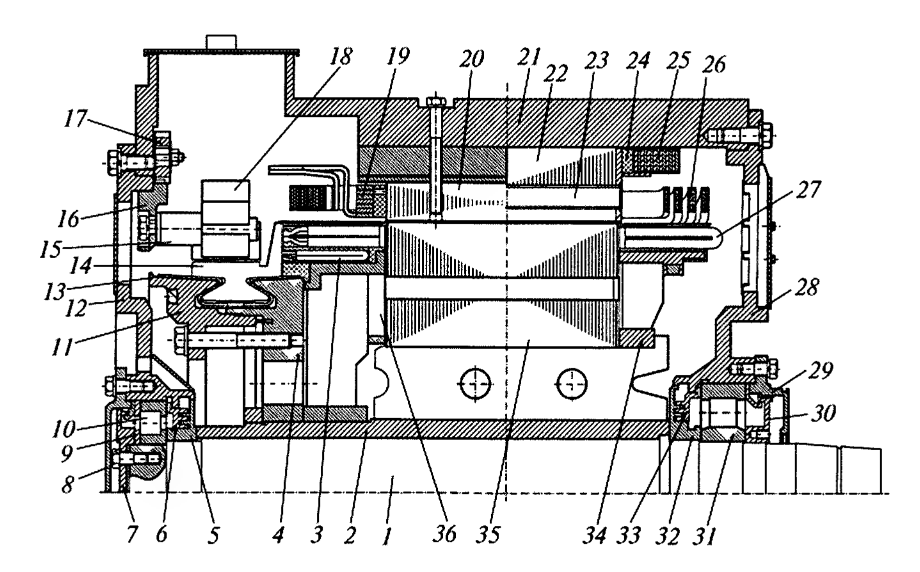


Рис. 2.56. Разрез тягового электродвигателя ДТК-800КЭ:
1 — вал; *2* — втулка якоря; *3* — уравнительные соединения; *4* — втулка коллектора; *5*, *32* — уплотнительные кольца; *6*, *33* — лабиринтные уплотнения; *7* — нажимная шайба; *8*, *29* — наружные кольца подшипника; *9* — упорное кольцо; *10*, *31* — подшипники; *11* — нажимной конус; *12*, *28* — малый и большой подшипниковые щиты; *13* — изоляция коллектора; *14* — коллектор; *15* — изолятор щеткодержателя; *16* — траверса; *17* — поворотное устройство траверсы; *18* — щеткодержатель; *19*, *20* — обмотка катушки и сердечник добавочного полюса; *21* — остов; *22* — сердечник главного полюса; *23* — стержень; 24 — изоляционная прокладка; *25* — обмотка катушки главного полюса; *26* — компенсационная обмотка; *27* — обмотка якоря; *30* — лабиринтное кольцо; *34*, *36* — задняя и передняя нажимные шайбы; *35* — сердечник якоря

Катушка возбуждения содержит 14 витков, выполненных проводом ПСДКТ-Л. К крайним виткам припаивают выводы из медной шины. Для корпусной изоляции используют обмоточную ленту POROBANT SI 0790, для покровной — стеклянную ленту. Между катушкой полюса и остовом прокладывают шайбу из материала PORMAT 2248, благодаря чему обеспечивается предохранение изоляции катушки от повреждений и плотное прилегание между остовом и заплечиками полюса.

Сердечник добавочного полюса *20* выполнен сплошным из стального листа. К полюсному наконечнику крепятся планки из немагнитной стали, удерживающие катушку добавочного полюса.

Болты, крепящие сердечник полюса к остову, также изготовлены из немагнитной стали. Между сердечником полюса и остовом установлены диамагнитные прокладки, уменьшающие его магнитное насыщение. Катушка *19* добавочного полюса изготовлена из мягкой медной проволоки. Ее корпусная изоляция такая же, как у катушки главного полюса. В двух добавочных полюсах установлены датчики контроля температуры обмоток тягового двигателя. Датчик температуры представляет собой терморезистор, установленный в специальное гнездо, образованное пазом на сердечнике полюса и катушкой. Провода от терморезисторов выведены на вилку, расположенную в коробке выводов тягового электродвигателя. Поперечное сечение проводника обмотки добавочного полюса выбирается из расчета тока обмотки, равного току якоря тягового электродвигателя.

Компенсационная обмотка *26* состоит из шести отдельных катушек, по 11 витков каждая, намотанных из мягкой медной ленты. Межвитковая и основная корпусная изоляция катушки выполнена полиамидной лентой; короностойкий слой корпусной изоляции выполнен лентой Porofol CR/2578; покровная — стеклолентой. От механических повреждений изоляция защищена изоляционными пазовыми гильзами. В пазах полюса обмотка крепится клиньями из профильного стеклопластика.

Остов с установленными главными полюсами, добавочными полюсами и компенсационной обмоткой пропитывается в кремнийорганическом компаунде с последующим запеканием.

Траверса *16* разрезная, по наружному ободу имеет зубчатый венец, входящий в зацепление с зубьями шестерни поворотного механизма. На траверсе закреплены шесть кронштейнов с изоляционными пальцами, к которым прикреплены щеткодержатели.

Щеткодержатели вместе с траверсой выполняют следующие функции:

– удерживают щетки в установленном положении, обеспечивают свободное перемещение щетки без перекоса при работе и по мере износа щетки;

– обеспечивают нормативное давление на щетку;

– осуществляют передачу тока от щеток к якорю;

– уменьшают вибрацию при минимальном расстоянии до окружности коллектора.

В окно щеткодержателя устанавливают две разрезные щетки марки ЭГ64К.

Якорь состоит из коллектора *14*, сердечника *35*, вала *1*, втулки якоря, задней и передней нажимных шайб *34* и *36*, обмотки якоря *27*. Коллекторные пластины выполняют из холоднокатаной меди и изолируют друг от друга миканитовыми прокладками. Нижняя часть коллекторных пластин, выполненная в виде «ласточкина хвоста», изолирована миканитовой манжетой и изоляционным цилиндром и закреплена нажимным конусом *11* и вторым конусом, который находится на втулке *4*. Конусы стянуты болтами. Затяжка болтов приближает конус к втулке, при этом коллекторные пластины сжимаются, образуя жесткий цилиндр.

На вал *1* насажена с натягом втулка *2* якоря, на которой напрессован сердечник якоря *35*. Сердечник состоит из штампованных листов электротехнической стали марки 2212 толщиной 0,5 мм. Листы изолированы друг от друга пленкой лака КФ-965 толщиной 0,012—0,014 мм на одну сторону. Сердечник закреплен на втулке нажимными шайбами *34* и *36*. В сердечнике сделаны пазы, куда уложена простая петлевая обмотка якоря *27* с уравнителями *3*. Обмотка якоря в пазах закреплена стеклопластиковыми клиньями. Лобовые части обмотки закреплены стеклобандажом. В сердечнике также имеются аксиальные каналы для прохода охлаждающего воздуха. Благодаря втулке можно заменять поврежденный вал без полной разборки якоря. Для предотвращения «распушения» крайние листы сердечника выполнены из стали Ст2кп толщиной 1 мм и попарно сварены точечной контактной сваркой.

Вал *1* якоря изготовлен из хромоникелевой стали 20ХН3А с термической обработкой. Вал выполнен с минимально возможным числом переходов по диаметру, причем последние осуществляются галтелями определенного радиуса во избежание концентрации напряжений. Конусность концов вала 1:10. Цилиндрические поверхности вала обработаны под посадку втулки якоря *2*, внутренних колец подшипников *10* и *31*, уплотнительных колец подшипниковых узлов *5* и *32*. Конусная часть вала предназначена для установки шестерни зубчатой передачи.

Для снятия шестерни с вала гидравлическим способом в торце вала имеется специальное отверстие с резьбой, а также отверстие с резьбой для ввинчивания рым-болта при транспортировании якоря.

Корпусная изоляция выполнена из полиамидной ленты; короностойкий слой корпусной изоляции — из ленты Porofol CR/2578; покровная изоляция — из стеклоленты. Для повышения влагостойкости изоляции и повышения ее срока службы якорь пропитывают вакуум-нагнетательным способом в кремнийорганическом компаунде.

Подшипниковые щиты *12* и *28* выполнены сварными и предназначены для крепления якорных подшипников. Форма внутренней поверхности подшипниковых щитов обеспечивает требуемое направление потока вентилируемого воздуха.

Тяговый электродвигатель **НБ-520В** предназначен для приведения во вращение колесных пар пассажирского электровоза ЭП1. Передача вращающего момента осуществляется через торсионный вал, зубчатую муфту и одностороннюю зубчатую передачу с приводом второго класса. Закреплен двигатель на тележке опорно-рамным подвешиванием.

Технические характеристики тягового электродвигателя НБ-520В У1 приведены в табл. 2.3

Таблица 2.3

Технические характеристики тягового электродвигателя НБ-520В У1

Наименование параметров	Режим работы	
	часовой	продолжительный
Мощность, кВт	800	750
Напряжение на коллекторе, В	1000	
Ток якоря, А	845	795
Частота вращения якоря, об/мин	1030	1050
Частота вращения наибольшая, об/мин	2020	
Расход вентилируемого воздуха, $м^3$/мин	70	
КПД, %	94,6	94,5
Класс изоляции	Н	
Напряжение изоляции относительно корпуса, В	2500	
Масса, кг	3500	

У этого тягового электродвигателя много общих конструктивных решений с электродвигателем ДТК-800.

Остов *13* (рис. 2.57) — стальной, сварной. К его внутренней стороне прикреплены болтами шесть главных *17* и шесть добавочных

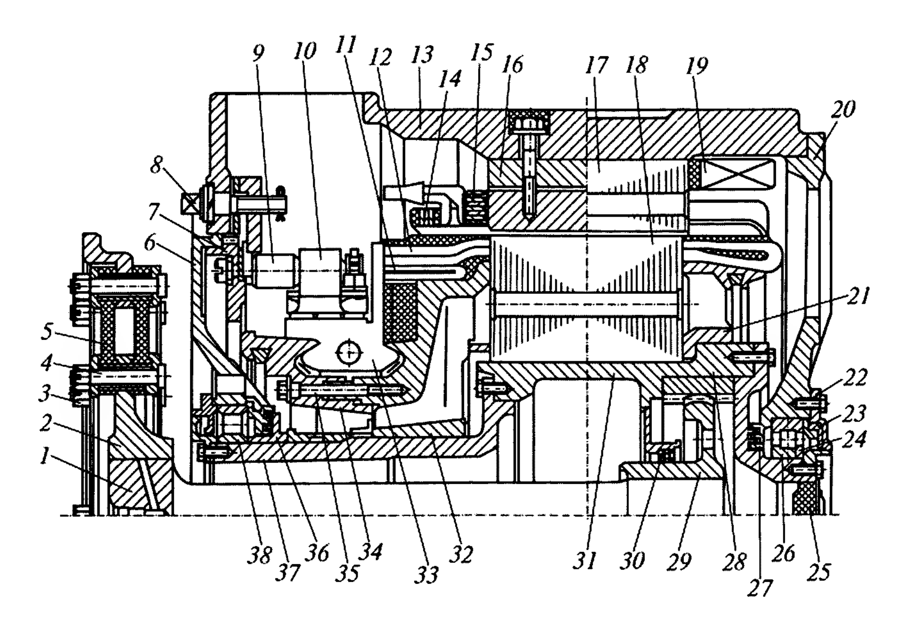


Рис. 2.57. Разрез тягового электродвигателя НБ-520В:
1 — торсионный вал; *2* — фланец; *3* — гайка; *4*, *35* — болты; *5* — упругий элемент; *6* — малый подшипниковый щит; *7* — траверса; *8* — поворотное устройство траверсы; *9* — палец; *10* — щеткодержатель; *11* — уравнительные соединения; *12* — обмотка якоря; *13* — остов; *14* — компенсационная обмотка; *15*, *16* — обмотка и сердечник добавочного полюса; *17* — сердечник главного полюса; *18* — сердечник якоря; *19* — обмотка главного полюса; *20* — большой подшипниковый щит; *21*, *32* — задняя и передняя нажимные шайбы; *22* — крышка подшипника; *23* — нажимное кольцо; *24* — регулировочная прокладка; *25* — манжета; *26*, *38* — подшипники; *27* — внутреннее кольцо; *28* — венец зубчатой муфты; *29* — зубчатая полумуфта; *30* — сальник; *31* — барабан; *33* — коллектор; *34* — нажимной конус; *36* — лабиринтное уплотнение; *37* — втулка якоря

полюсов *16* с обмотками возбуждения соответственно *19* и *15*. В наконечниках главных полюсов делают пазы, куда уложена компенсационная обмотка *14*.

Якорь состоит из сердечника *18*, обмотки *12*, барабана *31*, втулки *37*, задней и передней нажимных шайб — *21* и *32*, коллектора *33*. Конструкция коллектора — такая же, как у двигателя ДТК-800КЭ.

Обмотка якоря *12* простая петлевая с уравнителями *11* первого рода, расположенными на стороне коллектора под катушками якоря. На дно паза якоря уложена лента 0,3×25×300 мм из изоляции Ими-

дофлекс-292. Корпусная изоляция из двух слоев ленты 0,3×26×444 Имидофлекс-292 и шести слоев ленты 0,3×21×444 мм Имидофлекс-292 закрепляются одним слоем ленты ЛЭСБ размером 0,2×35 мм в полуперекрышу. Межслойная изоляция из двух слоев ленты 0,3×110×440 мм Имидофлекс-292, трех слоев ленты 0,3×40×268 мм Имидофлекс-292, трех слоев ленты 0,3×55×268 мм Имидофлекс-292 со смещением стыков слоев относительно друг друга на 30 мм.

Лобовые части обмотки якоря уложены на переднюю и заднюю части обмоткодержателей, куда предварительно уложен защитный электрокартон размером 0,5×125×320 мм и закреплен стеклолентой. Стыки электрокартона смещены относительно друг друга на 30—50 мм. Обмотка удерживается в пазах клиньями из профильного стеклопластика. Для плотной посадки обмотки устанавливают необходимое число прокладок из ленты Имидофлекс-292 размером 0,3×7,5×295 мм. Сверху лобовые части обмотки якоря закреплены стеклобандажом.

Передача вращающего момента осуществляется торсионным валом с зубчатой муфты на вал шестерни тягового редуктора через упругий элемент. Втулка якоря *37* полая. Внутри вала находится зубчатая муфта, состоящая из венца *28* и зубчатой полумуфты *29*, передающей вращающий момент на торсионный вал *1*. Зубчатая муфта делает возможным аксиальные перемещения торсионного вала, за счет чего снимаются аксиальные нагрузки на подшипники, неблагоприятно влияющие на их работоспособность. Зацепление между зубчатой полумуфтой *29* и зубчатым венцом *28* осуществлено на большом диаметре, что обеспечивает незначительный уровень напряжений, возникающих при передаче вращающего момента. Этим достигается необходимая долговечность узла. С зубчатой муфты вращающий момент передается через торсионный вал *1* и упругую муфту, содержащую фланец *2* и упругий элемент *5*, на вал шестерни тягового редуктора.

2.8. Вспомогательные машины постоянного тока

Электрические машины, обслуживающие собственные нужды электровозов, тепловозов, дизель-поездов и электропоездов называют *вспомогательными машинами*. В электропоездах и дизель-поездах вспомогательные машины обычно располагаются под кузовом, а в электровозах и тепловозах — внутри кузова.

Для пневматических тормозов поезда, а также для привода электрических аппаратов электровозов, тепловозов, дизель-поездов и электропоездов необходим сжатый воздух; для его получения устанавливают компрессоры со специальным двигателем. На некоторых тепловозах компрессор приводится во вращение дизелем. Для охлаждения тяговых электродвигателей, а в некоторых случаях пусковых реостатов, выпрямительных установок, сглаживающих реакторов и индуктивных шунтов, применяют *мотор-вентиляторы.*

При рекуперативном торможении для питания обмоток возбуждения тяговых электродвигателей электровозов постоянного тока применяют преобразователи, состоящие из двигателя и генератора.

Для питания цепей управления, освещения и зарядки аккумуляторных батарей применяют пониженное напряжение. Его вырабатывает *генератор управления.*

Электродвигатели **НБ-431П** служат приводом компрессоров КТ-6, которые сжатым воздухом питают пневматические сети электровозов ВЛ10, ВЛ11, ВЛ15.

Технические характеристики электродвигателя НБ-431П

Мощность, кВт	21
Напряжение, В	3000
Ток якоря, А	9,5
Частота вращения, об/мин	440
Класс изоляции	А
КПД, %	78,6
Система вентиляции	Независимая
Количество охлаждающего воздуха, $м^3$/мин	14
Масса, кг	1085

Электродвигатель НБ-431П (рис. 2.58) — постоянного тока четырехполюсный, с последовательным возбуждением. Остов цилиндрической формы отлит из стали 25Л-1. На стороне, противоположной коллектору, имеются окна, закрытые сеткой, для выхода вентилирующего воздуха, а в нижней части — лапы для крепления его к фундаменту.

Сердечники *15* главных полюсов набраны из тонколистовой стали Ст2 толщиной 1,5 мм и скреплены стальными заклепками. Сердечники прикреплены к остову тремя стальными шпильками М24. Катушка *16* главного полюса изготовлена из обмоточной меди марки ПСД диаметром 1,81 мм. Корпусная изоляция катушек выпол-

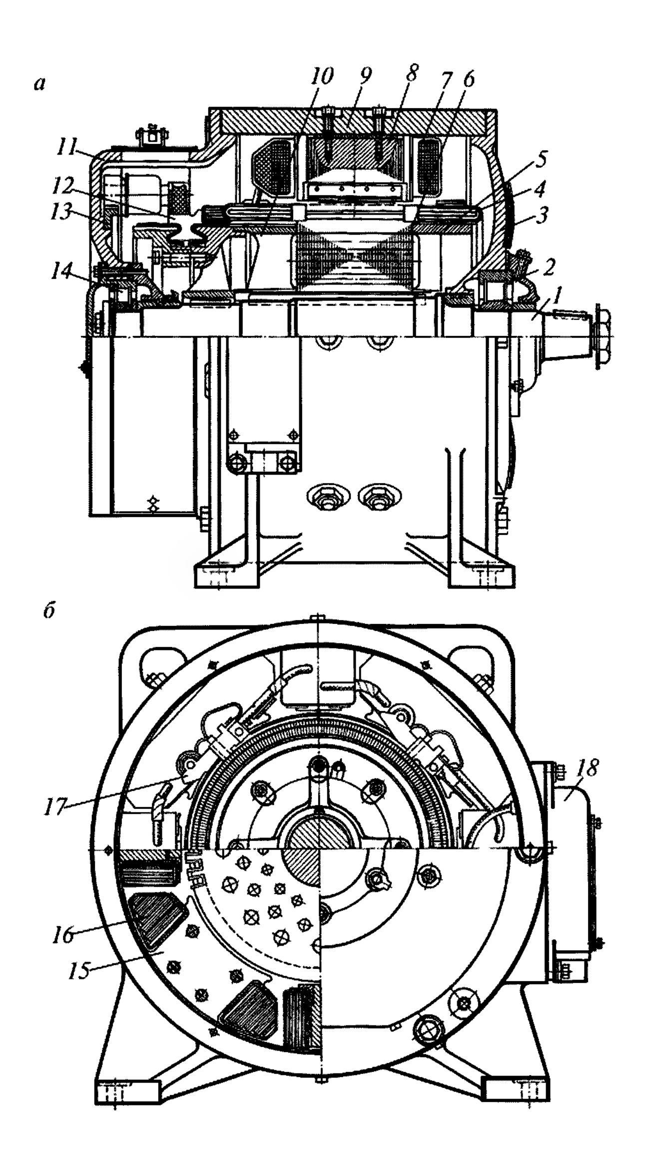


Рис. 2.58. Продольный (*а*) и поперечный (*б*) разрез электродвигателя НБ-431П: *1* — вал якоря; *2*, *14* — якорные подшипники; *3*, *11* — подшипниковые щиты; *4* — обмотка якоря; *5*, *10* — нажимные шайбы якоря; *6* — сердечник якоря; *7*, *8* — катушка и сердечник добавочного полюса; *9* — корпус; *12* — коллектор; *13* — траверса; *15*, *16* — сердечник и катушка главного полюса; *17* — щеткодержатель; *18* — коробка выводов

нена из шести слоев стеклослюдинитовой ленты и одного слоя технической лавсановой термоусаживающейся ленты, уложенной в полуперекрышу.

Сердечники *8* добавочных полюсов изготовлены из толстолистового стального проката и прикреплены к остову двумя латунными болтами М16. Между сердечником добавочного полюса и остовом проложены диамагнитные (из дюралюминия) прокладки толщиной 1 мм. Корпусная изоляция обмотки возбуждения добавочных полюсов такая же, как и главных.

На поворотной траверсе закреплены четыре щеткодержателя. В щеткодержателе установлено по одной щетке марки ЭГ-61.

***Электродвигатели* НБ-430А и ТЛ-110** предназначены для привода вентиляторов и генераторов управления на грузовых электровозах постоянного тока ВЛ10, ВЛ11.

Для крепления остова *1* (рис. 2.59) электродвигателя ТЛ-110 на фундаментной плите предусмотрены лапы. Снаружи остова находятся приливы с отверстиями для транспортировки и прилив для коробки выводов *14*.

Сердечники главных полюсов *2* собраны из отдельных пластин электротехнической стали и прикреплены шпильками к остову. Пластины стянуты заклепками. Катушки главных полюсов, изготовленые из медной шины сечением 2,26×3,8 мм, имеют 287 витков.

Сердечники добавочных полюсов *3* выполнены из стали сплошными. Их крепят к остову болтами. Для уменьшения магнитного насыщения сердечников добавочных полюсов между их сердечниками и остовом установлены диамагнитные прокладки из дюралюминия. Их катушки изготовлены из меди марки ПСД сечением 1,95×3,8 мм и имеют по 120 витков каждая.

Каждую катушку главных и добавочных полюсов изолируют шестью слоями стеклослюдинитовой ленты ЛС-40Ру-ТТ и одним слоем стеклоленты ЛЭС в полуперекрышу.

Якорь электродвигателя состоит из коллектора *11*, сердечника, выполненного из отдельных листов электротехнической стали 1312 толщиной 0,5 мм и имеющего три ряда аксиальных отверстий для прохода охлаждающего воздуха, волновой обмотки *13* якоря, уложенной в пазы сердечника, передней и задней нажимных шайб, вентилятора *4* и вала. Сердечник якоря с нажимными шайбами и

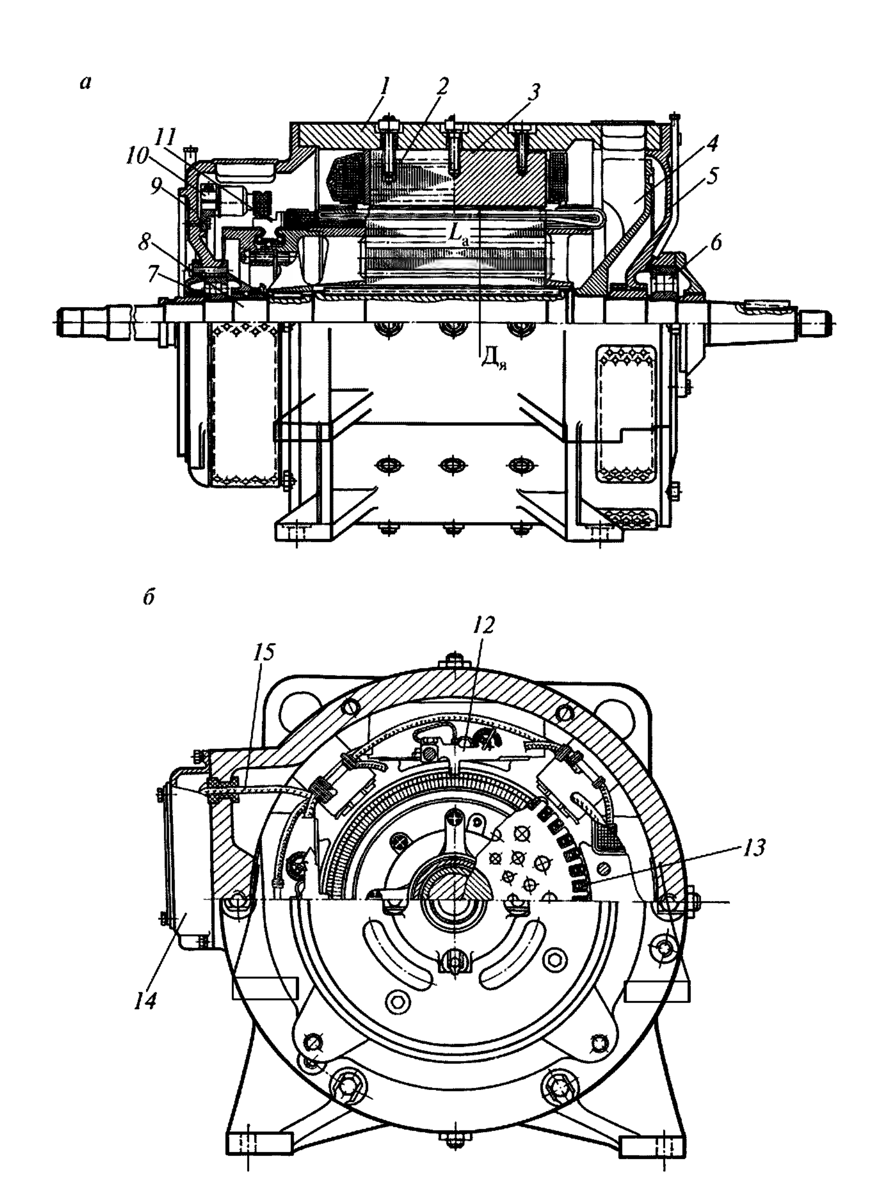


Рис. 2.59. Продольный (*а*) и поперечный (*б*) разрезы двигателей НБ-430А:
1 — остов; *2* — главный полюс; *3* — добавочный полюс; *4* — вентилятор; *5*, *9* — подшипниковые щиты; *6*, *7* — якорные подшипники; *8* — вал; *10* — траверса; *11* — коллектор; *12* — щеткодержатель; *13* — обмотка якоря; *14* — коробка выводов; *15* — выводы

коллектор напрессованы на вал. Медные пластины коллектора изолированы друг от друга миканитовыми прокладками, а от корпуса миканитовыми манжетами и цилиндром.

Корпусная изоляция катушек якоря состоит из шести слоев стеклослюдинитовой ленты ЛСЭК-5-СПл и одного слоя стеклоленты толщиной 0,11 мм, одного слоя ленты фторопласта толщиной 0,03 мм и одного слоя стеклоленты толщиной 0,1 мм, уложенных в полуперекрышу. Лобовые части обмотки якоря закреплены стеклобандажной лентой толщиной 0,18 мм.

Якорь опирается на роликовые подшипники, установленные в подшипниковых щитах, которые прикреплены к остову шестью болтами с пружинными шайбами. Подшипниковый щит со стороны коллектора имеет специальные приливы для крепления остова генератора управления НБ-110.

Щеточный аппарат состоит из поворотной траверсы *10*, в которой закреплены четыре изоляционных пальца. Палец представляет собой стальной стержень с напрессованной прессмассой АГ-4В, сверху которой насажен фарфоровый изолятор. На пальцах закреплены четыре щеткодержателя, которые можно регулировать в радиальном направлении. В каждом щеткодержателе установлено по одной щетке ЭГ-61.

Генераторы управления **НБ-110** предназначены для питания цепей управления, освещения и обмоток возбуждения преобразователей НБ-436В.

Технические характеристики генератора управления НБ-110

Мощность, кВт	8
Напряжение, В	64
Ток якоря, А	125
Ток возбуждения, А	3,9
Частота вращения, об/мин	990
Возбуждение	Независимое
КПД, %	82,54
Масса, кг	300

Генератор НБ-110В (рис. 2.60) представляет собой четырехполюсную машину и состоит из остова *5*, якоря *4*, щеточного аппарата *1*.

Остов генератора с торцевой стороны закреплен на подшипниковом щите электродвигателя ТЛ-110М, установленном со сторо-

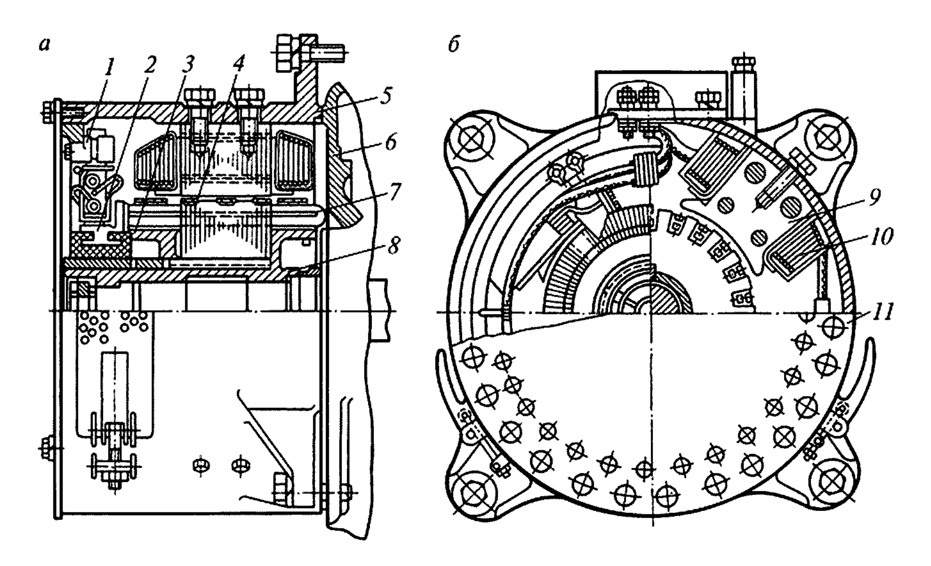


Рис. 2.60. Продольный (*а*) и поперечный (*б*) разрезы генератора управления НБ-110В:

1 — щеточный аппарат; *2* — коллектор; *3* — нажимная шайба; *4* — сердечник якоря; *5* — остов; *6* — подшипниковый щит; *7* — обмотка якоря; *8* — втулка; *9*, *10* — сердечник и катушка главного полюса; *11* — крышка

ны коллектора. Остов отлит из стали 25Л-1 и имеет цилиндрическую форму. Сердечник *9* главного полюса набран из тонколистовой стали Ст2 толщиной 1,5 мм и скреплен стальными заклепками. Сердечник полюса крепится к остову двумя болтами.

Катушка *10* главного полюса намотана проводом ПСД диаметром 2,12 мм и имеет 510 витков. Корпусная изоляция катушек выполнена из стеклослюдинитовой ленты ЛСЭП-934-ТПл в три слоя в полуперекрышу.

Якорь генератора насажен консольно на цилиндрическую часть вала электродвигателя ТЛ-110М и состоит из сердечника *4* с волновой обмоткой *7*, коллектора *2*, передней нажимной шайбы *3*, напрессованной на втулку *8*. Сердечник якоря набран из листов электротехнической стали 1312 толщиной 0,5 мм.

Коллектор генератора состоит из 107 пластин, изолированных друг от друга миканитовыми прокладками и собранных в пластмассовом корпусе, являющемся несущим изолирующим элементом конструкции.

Щеточный аппарат генератора состоит из траверсы поворотного типа, на которой укреплены четыре изоляционных пальца со щеткодержателями.

Генератор имеет независимую вентиляцию. Воздух через отверстия в крышке *11* и крышках коллекторных люков поступает в генератор и затем затягивается через отверстия в подшипниковом щите электродвигателя.

Общепромышленные машины постоянного тока, применяемые в тяговом подвижном составе. Общепромышленные электродвигатели серии П и 2П широко применяются в тяговом подвижном составе. На ЭПС переменного тока — это электродвигатели привода главного контроллера ЭКГ-8Ж, привода вспомогательного компрессора для поднятия токоприемника и др.

Машины этой серии характеризуются общностью конструктивных решений, технологии производства, применяемых материалов.

Основная часть серии П охватывает генераторы и двигатели с номинальной мощностью 0,3—200 кВт. Эта часть серии разбита на 11 габаритов (размеров). Машины каждого габарита имеют определенный диаметр якоря $D_а$, а именно:

Номер габарита	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$D_а$, мм	83	106	120	138	162	195	210	245	294	327	368

Каждый габарит включает в себя машины с двумя различными длинами сердечника якоря. Это позволяет использовать технологическую оснастку данного габарита (штампы якоря, полюсов и пр.) и различные детали (щиты, подшипниковые узлы и пр.) для изготовления машин разной мощности при одинаковой частоте вращения. Тип П-41, например, обозначает машину серии П, 8-го габарита, с более коротким якорем, а П-42 — с более длинным якорем.

Изготавливают эти двигатели с параллельным и смешанным возбуждением. Устройство таких двигателей рассмотрено выше.

Контрольные вопросы

1. Из каких частей состоит машина постоянного тока?
2. Каково назначение и устройство коллектора?
3. Каково назначение и устройство щеткодержателя?
4. Каково назначение и устройство секции якоря?

5. Как определить первый частичный шаг?

6. Какие существуют виды обмоток якорей машин постоянного тока?

7. Каковы условия симметрии обмоток якорей?

8. Что представляют собой уравнительные соединения первого рода?

9. Какими параметрами характеризуется обмотка якоря?

10. Сколько параллельных ветвей имеет обмотка якоря шестиполюсной машины?

11. От каких параметров зависит ЭДС якоря?

12. Какие участки содержит магнитная цепь машины?

13. Каково назначение компенсационной обмотки?

14. Каковы причины искрения на коллекторе?

15. Какие степени искрения предусмотрены стандартами?

16. Почему прямолинейная коммутация не сопровождается искрением?

17. Объясните назначение и устройство добавочных полюсов.

18. Какие характеристики определяют свойство генераторов постоянного тока?

19. Каковы условия самовозбуждения генераторов постоянного тока?

20. Какие способы ограничения пускового тока применяются в двигателях постоянного тока?

21. Почему двигатель последовательного возбуждения нельзя включать вхолостую?

22. Какие существуют виды подвешивания тяговых электродвигателей?

Глава 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Общие сведения о машинах переменного тока

Машины переменного тока в зависимости от электромагнитной системы подразделяются на синхронные, асинхронные и коллекторные. В зависимости от числа фаз они, в свою очередь, делятся на однофазные, двухфазные, трехфазные и многофазные.

Из электрических машин переменного тока на тяговом подвижном составе преимущественно применяют трехфазные. Однофазные используют редко, однако принцип включения трехфазного двигателя в однофазную сеть применяется.

В основу работы электрических машин переменного тока положен принцип образования вращающегося магнитного поля. Если частоты вращения вращающегося магнитного поля статора и ротора одинаковы, то такие машины называются *синхронными*. Если частоты вращения вращающегося магнитного поля статора и ротора отличаются друг от друга, машина называется *асинхронной*. Ротор асинхронной машины вращается несинхронно относительно вращающегося магнитного поля.

Как синхронные, так и асинхронные машины обладают свойством обратимости, т.е. каждая из них может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Особый класс машин переменного тока составляют коллекторные машины переменного тока. На ТПС коллекторные машины переменного тока практически не применяются. Чаще всего применяют универсальные коллекторные двигатели, работающие как на постоянном, так и на переменном токе в качестве привода ручного электрифицированного инструмента, а также в устройствах автоматики.

Устройство статора. Вращающееся магнитное поле замыкается по сердечнику статора *2* (рис. 3.1, *а*), который собирается из отдельных листов электротехнической стали, обычно покрытых с обеих сторон масляно-канифольным изоляционным лаком.

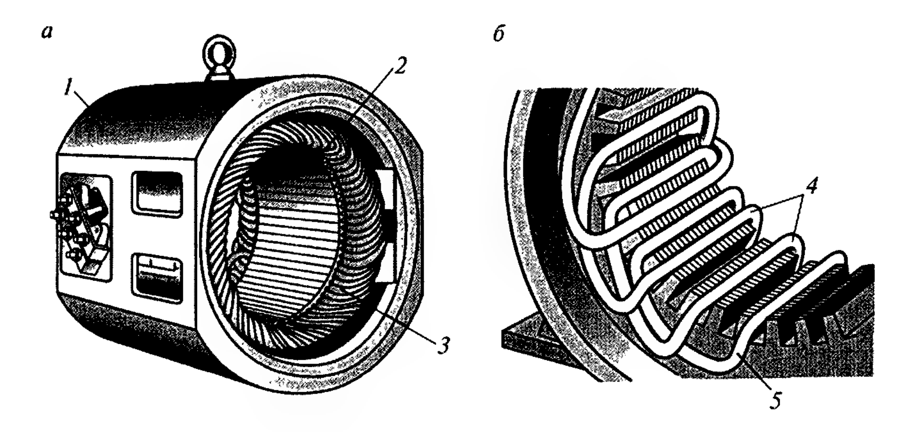


Рис. 3.1. Статор бесколлекторной машины переменного тока (*а*) и расположение катушек в пазах сердечника статора (*б*):
1 — корпус; *2* — сердечник статора; *3* — обмотка статора; *4* — пазовые стороны обмотки; *5* — лобовые части обмотки

Листы сердечников статоров электрических машин малой мощности иногда не покрывают лаком, так как в этом случае изоляцией является оксидная пленка на поверхности листов, которую создают искусственным путем или же она появляется естественным образом.

Сердечник статора закрепляют в корпусе *1*. В сердечнике делают пазы, куда укладывают трехфазную обмотку *3*, выводы которой присоединяют к сети трехфазного тока.

Обмотки статоров. Простейшим элементом обмотки статора является секция, которая состоит из нескольких витков, образуя катушку. Катушку располагают в пазах. Ширина катушки y приближенно равна полюсному делению τ: $y = \tau$.

Элементы катушки, находящиеся в пазах, называют пазовыми сторонами *4* (рис. 3.1, *б*), а элементы, соединяющие пазовые стороны в электрическую цепь — лобовыми частями *5*.

Обмотки статоров подразделяются на *однослойные* и *двухслойные*. У двухслойных катушек пазовая сторона катушки занимает половину паза по его высоте; другую половину этого паза занимает пазовая сторона другой катушки. Двухслойные обмотки подразделяются на петлевые и волновые.

Однослойные обмотки различают по выполнению катушек и размещению лобовых частей. Каждая сторона катушки полностью за-

полняет паз сердечника. Если катушки имеют разную ширину, то катушки, составляющие катушечную группу, охватывают одна другую.

Обмотки статора характеризуются следующими параметрами: числом пазов в сердечнике статора Z; числом пар полюсов p; числом фаз m; числом пазов, приходящихся на полюс и фазу q. Они связаны соотношением

$$Z = 2mpq. \tag{3.1}$$

Используя это соотношение можно построить развернутую схему однослойной обмотки статора (рис. 3.2, *а*). Здесь лобовые части расположены в двух плоскостях (рис. 3.2, *б*).

На рис. 3.3, *а* в качестве примера показана двухслойная петлевая обмотка статора. В этом случае все лобовые части расположены в одной плоскости (рис. 3.3, *б*).

Образование вращающегося магнитного поля. На трехфазную обмотку статора, каждая фаза которой состоит из одной катушки, подаем трехфазное напряжение, при этом обмотка статора соединена «звездой» (хотя на образование вращающегося магнитного поля соединение обмоток статора «звездой» или «треугольником» влияние не оказывает). На волновой диаграмме токов (рис. 3.4) проводим вертикальные линии, соответствующие различным моментам времени и обозначенные цифрами 0, 1, 2, 3. Ниже под каждой лини-

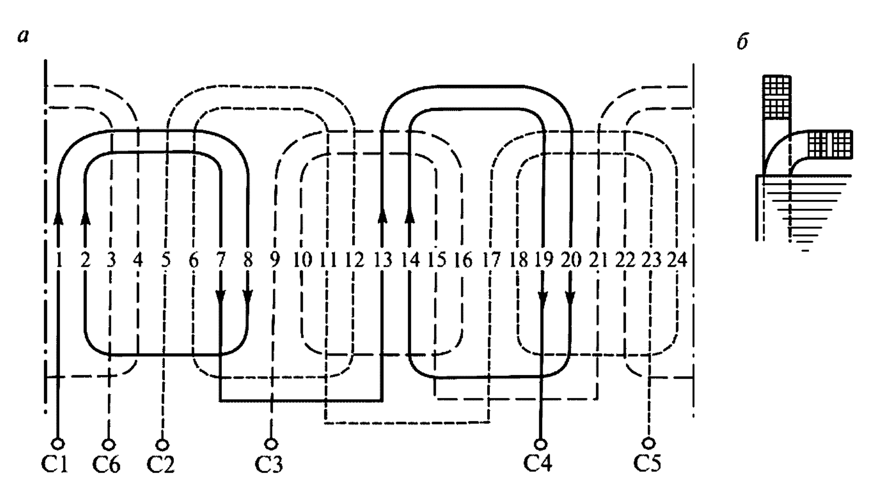


Рис. 3.2. Развернутая схема однослойной обмотки статора (*а*) и расположение лобовых частей (*б*)

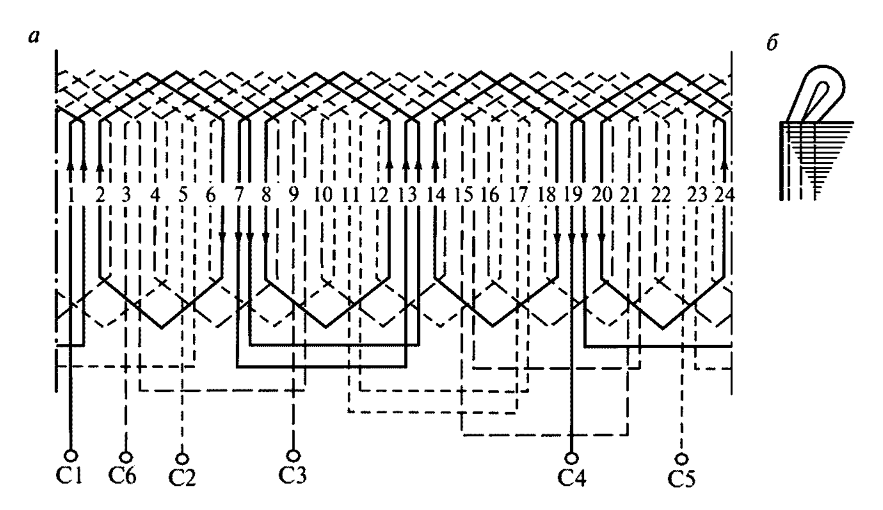


Рис. 3.3. Развернутая схема двухслойной обмотки статора (*а*) и расположение лобовых частей (*б*)

Рис. 3.4. Образование вращающегося магнитного поля статора:
а — волновая диаграмма; *б* — направление токов и МДС F_1 в обмотках статора

ей изображаем обмотку статора. В момент времени 0 ток в фазе A равен нулю, в фазе C имеет положительное направление, а в фазе B — отрицательное. Это направление токов отмечаем в катушках статора. Соответственно концы фаз катушек X, Y, Z будут иметь противоположное направление. По правилу буравчика определим направление магнитных силовых линий вокруг катушек, а также направление магнитодвижущих сил (МДС) F_1 трехфазной обмотки статора. Из построенной диаграммы видно, что вектор МДС F_1 поворачивается относительно своего положения на такой же угол в пространстве, что и мгновенные значения токов во времени, и за один период переменного тока делает полный оборот на 360°.

В общем случае получаем, что частота вращения вектора МДС n_1 пропорциональна частоте тока f_1 и обратно пропорциональна числу пар полюсов p:

$$n_1 = 60 f_1 / p. \qquad (3.2)$$

3.2. Асинхронные двигатели

Принцип действия и режимы работы. Как указывалось выше, статоры синхронных и асинхронных машин одинаковы. Ротор асинхронной машины включает в себя вал, сердечник и обмотку. Обмотка ротора состоит из восьми алюминиевых стержней, расположенных в пазах сердечника ротора и замкнутых по концам этих стержней алюминиевыми кольцами. Если включить обмотку статора в сеть, то образуется вращающееся магнитное поле статора с частотой вращения, определяемой выражением (3.2).

Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмоток статора и ротора и индуктирует в них ЭДС: в обмотке статора — ЭДС самоиндукции, а в обмотке ротора — ЭДС взаимоиндукции. Так как обмотка ротора замкнута, то по ней потечет ток, создавая магнитное поле ротора. Взаимодействие магнитных полей статора и ротора приводит к появлению электромагнитной силы $F_{эм}$, направление которой определяется по правилу левой руки. Совокупность сил $F_{эм}$ создает на роторе электромагнитный момент M, который приводит ротор во вращение с частотой n_2. Вращающийся вал ротора передает вращение рабочему механизму.

Частота вращения ротора асинхронного двигателя всегда меньше частоты вращения вращающегося магнитного поля статора. Ес-

ли бы частоты вращения магнитного поля статора и ротора были одинаковыми, проводник ротора и магнитная силовая линия статора не пересекали бы друг друга и в проводниках ротора не индуктировалась ЭДС взаимоиндукции. По проводникам ротора не протекал бы ток и магнитный поток ротора отсутствовал, также отсутствовала бы электромагнитная сила $F_{эм}$ и электромагнитный момент M.

Отставание частоты вращения ротора от частоты вращения магнитного поля статора характеризуется *скольжением.*

Скольжением s называется относительная разность частот вращения вращающегося магнитного поля статора и самого ротора:

$$s = (n_1 - n_2)/n_1. \tag{3.3}$$

Скольжение выражают в долях единицы или в %. В последнем случае величину, полученную по выражению (3.3) умножают на 100. Обычно скольжение у асинхронных двигателей составляет 2—6 %.

Частота вращения поля статора относительно поля ротора равна разности частот вращения $n_s = n_1 - n_2$. Вращающееся магнитное поле, обгоняя ротор с частотой вращения n_s, индуктирует в обмотках ротора ЭДС с частотой f_2. Частота тока в роторе:

$$f_2 = \frac{pn_s}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}\frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60}\frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s. \tag{3.4}$$

Частота тока вращающегося ротора составляет 1–3 Гц.

С увеличением момента сопротивления M_c частота вращения ротора n_2 уменьшается. Поэтому для двигательного режима скольжение изменяется в диапазоне

$$0 < s < 1. \tag{3.5}$$

В *генераторном* режиме необходимо возбудить асинхронную машину, подключив ее обмотку статора к трехфазной сети и с помощью приводного двигателя привести во вращение ротор асинхронной машины в направлении вращения магнитного поля статора с частотой, превышающей частоту вращения этого поля $n_2 > n_1$. В этом случае ротор будет обгонять поле статора и скольжение станет отрицательным:

$$s = \frac{-n_2 + n_1}{n_1}. \tag{3.6}$$

ЭДС обмотки ротора изменит свое направление и превысит напряжение сети. Вследствие этого асинхронная машина из потребителя электроэнергии превратится в ее источник и будет отдавать в сеть активную мощность P_2, т.е. будет работать генератором.

Скольжение в генераторном режиме находится в диапазоне

$$-\infty < s < 0. \tag{3.7}$$

Однако для асинхронного генератора необходим источник переменного тока, который создает возбуждение, т.е. создает вращающееся магнитное поле. В невозбужденной асинхронной машине режим генератора невозможен. Поэтому источником переменного тока служат синхронные генераторы.

Если у работающего асинхронного двигателя произвести реверсирование, т.е. изменить направление вращения ротора, то асинхронный двигатель под действием сил инерции будет все-таки продолжать вращаться в прежнем направлении. Таким образом, поле статора и ротор будут вращаться в прежних направлениях. Однако, электромагнитный момент, действующий в сторону вращения поля статора, будет тормозить ротор. Скольжение в этом режиме будет находиться в пределах

$$1 < s < +\infty.$$

На практике в этом режиме скольжение будет

$$1 < s < 2.$$

В режиме противовключения машина потребляет также механическую мощность с вала или с ротора, так как внешний вращающий момент действует в сторону вращения вала. Как мощность, потребляемая из сети, так и мощность, потребляемая из вала, расходуется на потери в машине. Полезной мощности в этом режиме машина не развивает, а в отношении нагрева рассматриваемый режим является тяжелым.

Из рассмотренных режимов работы асинхронной машины наиболее эффективным является двигательный. На современных локомотивах в качестве тяговых электродвигателей используются асинхронные.

Устройство. Асинхронный двигатель, как и машина постоянного тока, состоит из неподвижной части — статора — и вращающейся части — ротора.

Статор состоит из корпуса *7* (рис. 3.5), в который запрессован сердечник *6*, выполненный из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, покрытых слоем изоляционного лака. Пластины собраны в пакет, спрессованы, скреплены специальными скобами или продольными сварными швами по наружной поверхности пакета. Благодаря такой конструкции значительно уменьшаются вихревые токи, которые возникают в процессе перемагничивания сердечника вращающимся магнитным полем. В сердечнике

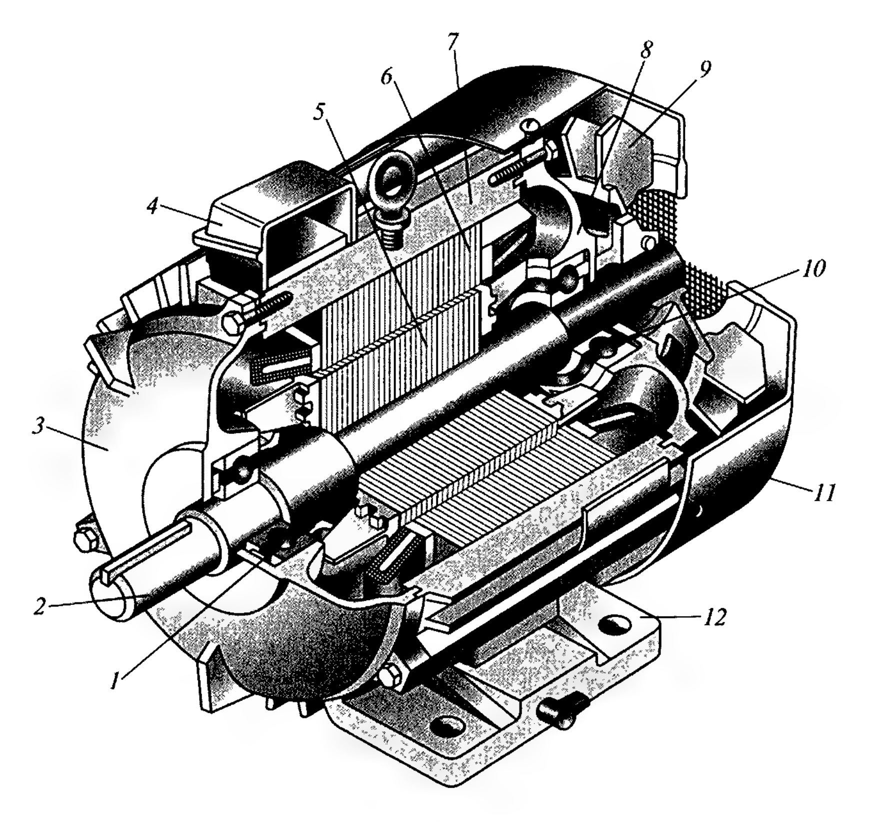


Рис. 3.5. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

1, *10* — подшипники; *2* — вал; *3*, *8* – подшипниковые щиты; *4* — коробка выводов; *5* — сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; *6* — сердечник статора с обмоткой; *7* — корпус; *9* — вентилятор; *11* — кожух вентилятора; *12* — лапы

делают пазы, куда укладывают трехфазную обмотку. Выводы обмотки располагают в коробке выводов *4*. Корпус двигателя отливают из алюминиевого сплава, стали или чугуна.

Если двигатель выполнен закрытым и обдуваемым, то на корпусе находятся ребра, увеличивающие поверхность охлаждения.

Роторы могут быть двух видов: короткозамкнутые и фазные. Фазные роторы на ТПС не применяют. Короткозамкнутый ротор состоит из вала *2*, на который напрессован сердечник *5*, выполненный из листов электротехнической стали. В сердечнике выполнены пазы, куда заливают расплавленный алюминий или его сплав. При отвердевании образуются стержни, к которым приваривают кольца. В некоторых случаях стержни и кольца отливают одновременно, при этом образуется короткозамкнутая обмотка типа «беличье колесо» (рис. 3.6, *а*). Иногда применяют медные стержни и кольца. В машинах малой мощности кольца отливают вместе с лопатками *3* (рис. 3.6, *б*), которые улучшают охлаждение машины. Листы сердечника ротора не покрывают изоляционным лаком, а создают на их поверхности тонкую пленку оксида. Этой меры достаточно для уменьшения вихревых токов, так как их величина невелика вследствие малой частоты перемагничивания.

Вал ротора опирается на подшипники качения *1* и *10*, расположенные в подшипниковых щитах *3* и *8* (см. рис. 3.5).

Поток воздуха создается центробежным вентилятором *9*, закрытым кожухом *11*. В подшипниковых щитах имеются отверстия, че-

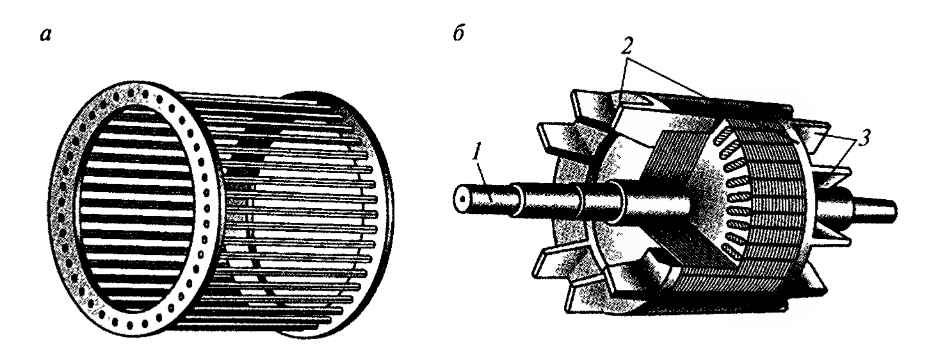


Рис. 3.6. Короткозамкнутый ротор:
а — обмотка «беличья клетка»; *б* — ротор с обмоткой: *1* — вал; *2* — короткозамкнутые кольца; *3* –вентиляционные лопатки

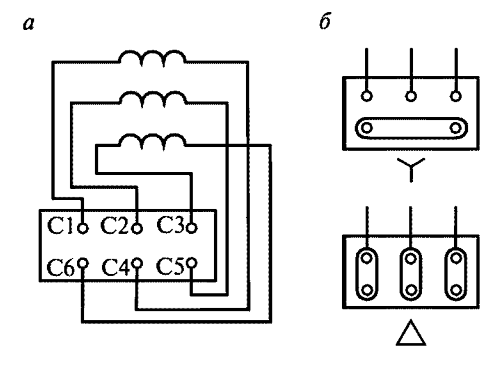


Рис. 3.7. Расположение выводов обмотки статора (*а*) и положение перемычек при соединении обмоток статора в «звезду» и в «треугольник» (*б*)

рез которые проходит воздух, омывающий внутреннюю полость двигателя. При этом охлаждаются наиболее нагретые части машины, такие как обмотки и сердечники.

Как указывалось выше, концы обмоток выводят в коробку выводов *4*. Начала обмоток обозначают С1, С2, С3, а их концы соответственно С4, С5 и С6 (рис. 3.7, *а*). На табличке, находящейся на корпусе двигателя, нанесены номинальные значения этого двигателя. При наличии в коробке шести выводов указываются два напряжения, отличающиеся друг от друга на $\sqrt{3}$ раз. Например, если двигатель рассчитан для включения в сеть на напряжение 380/220, то соединяют в «звезду», а если 220 В — в «треугольник». Клеммы выводов обмоток на панели коробки расположены таким образом, чтобы соединения обмоток фаз можно было удобно выполнить с помощью перемычек, без перекрещивания последних (рис. 3.7, *б*). Если в коробке выводов находятся три вывода, то соединение «звездой» или «треугольником» выполнено внутри двигателя и в табличке указывается одно напряжение, которое можно подключить к двигателю.

ЭДС, МДС и токи в асинхронном двигателе. *При неподвижном роторе* основной магнитный поток индуктирует в обмотке статора ЭДС:

$$E_1 = 4{,}44\,\Phi_m f_1\, w_1\, k_{об1}, \qquad (3.8)$$

где Φ_m — амплитуда магнитного потока, Вб;

f_1 — частота ЭДС;

w_1 — число витков обмотки статора;

$k_{об1}$ — обмоточный коэффициент, учитывающий распределение проводников по пазам статора, а также укорочение или удлинение шага обмотки.

Кроме основного магнитного потока, который сцепляется с проводниками обмотки статора и ротора, существует еще магнитный поток рассеяния, сцепляющийся только с проводниками од-

ной обмотки $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$. Потоки рассеяния создают ЭДС потоков рассеяния:

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_1 x_1; \tag{3.9}$$

$$\dot{E}_{2\sigma} = -j\dot{I}_2 x_2, \tag{3.10}$$

где x_1 и x_2 — индуктивные сопротивления рассеяния фазной обмотки статора, Ом.

ЭДС неподвижного ротора E_2 равна

$$E_2 = 4{,}44\,\Phi_m f_2\, w_2\, k_{об2},$$

где w_2 — количество витков обмотки ротора;

f_2 — частота тока в роторе, Гц;

$k_{об2}$ — обмоточный коэффициент, учитывающий распределение проводников по пазам ротора, а также укорочение или удлинение шага обмотки.

Ток обмотки статора I_1:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1} = \frac{E_1}{\sqrt{r^2 + x_1^2}} = \frac{4{,}44\,\Phi_m f_1 w_1 k_{об1}}{\sqrt{r^2 + (j2\pi fL)^2}}. \tag{3.11}$$

Ток обмотки неподвижного ротора:

$$I_2 = \frac{4{,}44\,\Phi_m f_2 w_2 k_{об2}}{\sqrt{r^2 + (j2\pi fL)^2}}. \tag{3.12}$$

Токи в статоре и ротора создают соответственно свои МДС F_1 и F_2:

$$F_0 = F_1 + F_2, \tag{3.13}$$

где F_0 — результирующая МДС двигателя, численно равная МДС обмотки статора в режиме холостого хода.

При вращающемся и неподвижном роторе ЭДС токи и МДС статора имеют одинаковые выражения. Но выражения этих величин, относящихся к ротору, отличаются.

Основной магнитный поток Ф, обгоняя ротор с частотой вращения $n_s = n_1 - n_2$, индуктирует в его проводниках ЭДС E_{2s} с учетом (3.4):

$$E_{2s} = 4{,}44\,\Phi_m f_1\, s\, w_2\, k_{об2}, \tag{3.14}$$

откуда

$$E_{2s} = E_2\, s. \tag{3.15}$$

Ток вращающегося ротора I_{2s}:

$$I_{2s}=\frac{E_{2s}}{\sqrt{r+(j2\pi fL)}}=\frac{E_{2s}}{\sqrt{r+(j2\pi fsL)}}. \tag{3.16}$$

Как указывалось выше, при вращении ротора s = 5 %, а при неподвижном роторе s = 100 %. Следовательно, ЭДС неподвижного ротора будет больше ЭДС вращающегося ротора в 100/5 = 20 раз.

Сравнив формулы (3.12) и (3.16), устанавливаем, что числитель формулы (3.12) больше числителя формулы (3.16) в 20 раз. Однако в формуле (3.16) s входит в знаменатель, в подкоренное выражение. Поэтому знаменатель выражения (3.16) будет меньше знаменателя выражения (3.12) приблизительно в 20 раз, что составляет $20/\sqrt{20} \approx 5$. Поэтому ток вращающегося ротора меньше тока неподвижного ротора примерно в 5—8 раз.

Таким образом, при включении двигателя, когда ротор неподвижен из-за инерции, наблюдается бросок пускового тока, превышающего номинальное значение примерно в 5—8 раз. По мере разгона ротора пусковые токи уменьшаются до номинального значения при номинальной нагрузке. Эти токи неопасны для двигателя, так как они кратковременны, их продолжительность 1—2 с и за это время они не успевают нагреть обмотки, но в сетях малой мощности могут вызвать падение напряжения. О способах их уменьшения см. ниже.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя создается взаимодействием тока ротора с вращающимся магнитным полем статора.

Обмотки статора и ротора обладают активным и индуктивным сопротивлениями. Однако активное и индуктивное сопротивления во много раз меньше, чем аналогичное сопротивление статора (в короткозамкнутом роторе проводники замкнуты кольцами, а в статоре катушки фаз содержат значительное количество витков и обладают значительным сопротивлением). Поэтому в электрических машинах применяют такой прием: все электрические величины ротора пересчитывают (приводят) к аналогичным величинам статора, т.е. обмотку ротора с числом фаз m_2, обмоточным коэффициентом $k_{об2}$ и числом витков одной фазной обмотки w_2 приравнивают к таким же величинам обмотки статора. Приведенные

(пересчитанные) величины обозначают штрихом, например U'_2, I'_2 и т.д. Кроме того, статор и ротор разделены воздушным зазором, который обладает значительным магнитным сопротивлением. Так как магнитный поток создается индуктивным током, то указанное сопротивление — индуктивное. Но приведение параметров ротора к параметрам статора не должно отразиться на его энергетических параметрах: все мощности, фазовые сдвиги векторов ЭДС и токов ротора должны оставаться такими же, как и в реальном асинхронном двигателе.

Для вывода уравнения механической характеристики рассмотрим баланс мощности в двигателе. Электромагнитная мощность $P_{эм}$, передаваемая ротору от статора вращающимся магнитным полем, определяется электромагнитным моментом M, развиваемым двигателем и равна

$$P_{эм} = M\omega = Mn/9{,}55. \qquad (3.17)$$

Мощность, передаваемую ротору, можно разделить на две составляющие — мощность, преобразуемую в механическую $P_{эм}$, и мощность потерь $P_{эл2}$ в роторе.

Первая составляющая $P_м = M_2\,\omega_2$.

Вторая составляющая представляет собой электрические потери в обмотках ротора и потери на перемагничивание ротора. Как правило, потери в роторе значительно меньше электрических потерь, в связи с чем первыми можно пренебречь. Тогда

$$P_{эм} = P_м + \Delta P_{эл2} \qquad (3.18)$$

или

$$M\omega_1 = M\omega_2 + \Delta P_{эл2}, \qquad (3.19)$$

отсюда

$$\Delta P_{эл2} = M(\omega_1 - \omega_2) = M\omega_1 s. \qquad (3.20)$$

Учитывая, что

$$P_{эл2} = m(I'_2)^2 R'_{2n}, \qquad (3.21)$$

где m — число фаз,

$$R'_{2n} = R'_2 + R'_n. \qquad (3.22)$$

Можно записать выражение для момента

$$M = \frac{m(I'_2)^2 I'_{2n}}{\omega s} = \frac{m_1(I'_2)^2 I'_{2n}p}{2\pi f_1 s}. \qquad (3.23)$$

Величина тока:

$$I_2' = \frac{U_ф}{\sqrt{(R+R)+(x+x)}}. \qquad (3.24)$$

Подставив значение тока I'_2 в формулу момента M, получим:

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 s\left[\left(r_1 + r_2'/s\right)^2 + \left(x_1 + x_2'\right)^2\right]}, \qquad (3.25)$$

где m_1 — число фаз обмотки статора;
$U_1{}^2$ — напряжение, подаваемое на обмотку статора;
r'_2 — приведенное активное сопротивление обмотки ротора;
p — число пар полюсов обмотки статора;
f_1 — частота питающего напряжения;
s — скольжение;
r_1 — активное сопротивление обмотки статора;
x_1 — реактивное сопротивление обмотки статора;
x'_2 — приведенное реактивное сопротивление обмотки ротора.

Из этой формулы следует

$$M \equiv U_1{}^2. \qquad (3.26)$$

Таким образом, уменьшение напряжения в 3 раза вызывает уменьшение электромагнитного момента в 9 раз. Для асинхронного двигателя опасно понижение питающего напряжения, так как это может вызвать его остановку — режим короткого замыкания.

Для нахождения максимума функции продифференцируем выражение (3.25) и приравняем его к нулю $dM/ds = 0$:

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1\left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(x_1 + x_2'\right)^2}\right]}; \qquad (3.27)$$

$$S_{кр} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \qquad (3.28)$$

На основании формул (3.25, 3.27, 3.28) можно построить механическую характеристику (рис. 3.8). Хотя выражения имеют знаки «±», характеристику построим для двигательного режима (знак «+»), так как генераторный режим в ЭПС практически не применяется. При скольжении $s = 1$ ротор асинхронного двигате-

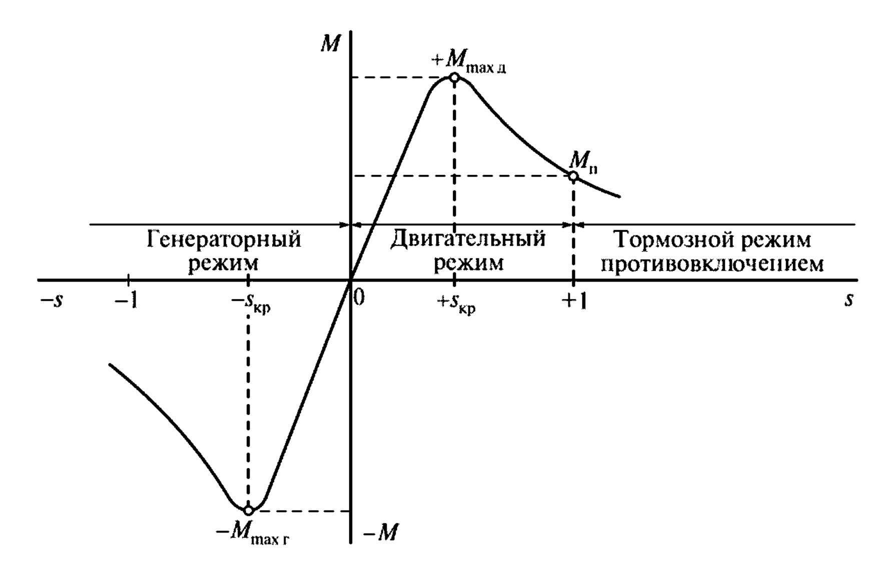


Рис. 3.8. Механическая характеристика асинхронной машины при различных режимах

ля неподвижный $n_2 = 0$. Если в формулу (3.25) подставить $s = 1$, то получим значение пускового момента $M_п$:

$$M_п = \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 \left[(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}. \qquad (3.29)$$

Под действием этого момента начинается вращение ротора двигателя, а скольжение уменьшается, причем вращающий момент вначале увеличивается, достигает максимума, а затем уменьшается до установившегося значения (рис. 3.9):

$$M = M_т + M_0, \qquad (3.30)$$

где $M_т$ — тормозной противодействующий момент, создаваемый рабочим органом;

M_0 — момент холостого хода, преодолевающий момент трения $M_{тр}$, создаваемый силами трения в подшипниках двигателя и на преодоление вентиляционного момента $M_{вент}$, необходимого для вращения вентилятора, расположенного на валу двигателя. Вследствие этого полезный момент двигателя, необходимый для привода рабочего органа механизма или машины, всегда меньше электромагнитного момента:

$$M_2 = M - M_0 = M_с.$$

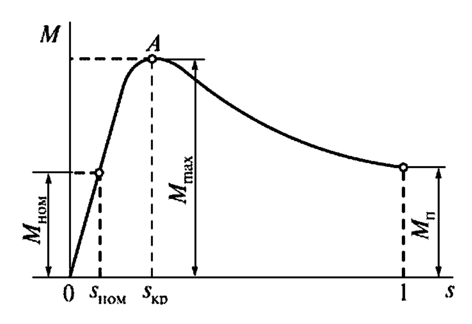


Рис. 3.9. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Рабочим органом является любое устройство (компрессор, вентилятор и др.), которое асинхронный двигатель приводит во вращение. При изменении $M_т$ на такую же величину изменяется электромагнитный момент M на участке 0А механической характеристики. Участок 0А называют рабочим участком. Если $M_т$ превысит величину 0А, то равенство моментов нарушится и частота вращения ротора начинает убывать до 0.

При пуске $M_п > M_т$, в противном случае не произойдет пуск двигателя.

Для *реверсирования асинхронного двигателя* достаточно поменять местами любые два провода из трех подводящих питание к асинхронному двигателю.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости частоты вращения n_2, КПД η, полезного момента M_2, коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ и тока статора I_1 от полезной мощности P_2 при U_1 = const и f_1 = const.

В скоростной характеристике

$$n_2 = (60f_1/p)(1 - s), \quad (3.31)$$

где n_2 — частота вращения ротора;
p — число пар полюсов;
s — скольжение, равное

$$s = \frac{P_{э2}}{P_{эм}}, \quad (3.32)$$

где $P_{э2}$ — электрические потери в роторе.

Так как электрические потери в роторе в режиме холостого хода ничтожно малы, можно принять $P_{э2}$ = 0, тогда скольжение в режиме холостого хода также ничтожно мало. По мере увеличения нагрузки скольжение (3.32) также увеличивается. Поэтому зависимость $n_2 = f(P_2)$ представляет собой кривую с небольшим наклоном к оси абсцисс.

Зависимость полезного момента M_2 от полезной мощности P_2 определяется выражением

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{60P_2}{2\pi n_2} = \frac{9{,}55P_2}{n_2}. \qquad (3.33)$$

Из выражения (3.33) видно, что с увеличением P_2 частота вращения уменьшается, следовательно, зависимость $M_2 = f(P_2)$ имеет криволинейный вид (рис. 3.10).

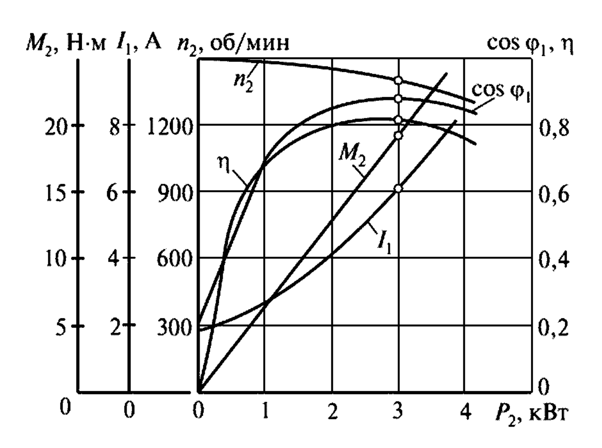


Рис. 3.10. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Коэффициент мощности $\cos\varphi_1$. Реактивная составляющая тока, как указывалось выше, создает основной магнитный поток. Поэтому при возрастании тока нагрузки реактивная составляющая тока практически не изменяется. Возрастает только активная составляющая тока (рис. 3.11). Значение $\cos\varphi_1$ при холостом ходе не превышает 0,2. Асинхронные двигатели проектируют таким образом, чтобы максимум $\cos\varphi_1$ (обычно 0,8—0,9) соответствовал номинальной нагрузке. *Поэтому для получения максимального* $\cos\varphi_1$ *необходимо асинхронный*

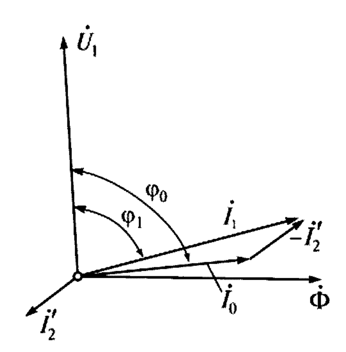


Рис. 3.11. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

двигатель использовать на полную мощность. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается уменьшением $\cos\varphi_1$, так как увеличивается индуктивное сопротивление ротора ($x_2 s$) вследствие увеличения скольжения и частоты тока в роторе.

Из формулы $P_2 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1$ найдем величину тока $I_1 = P_2/3U_1\cos\varphi_1$. При увеличении мощности P_2 величина тока I_1 увеличивается, так напряжение считаем неизменным, а $\cos\varphi_1$, как было доказано выше, увеличивается. Ток I_1 начинается не с нуля, а с некоторого значения, так как при холостом ходе $P_2 = 0$ двигатель потребляет некоторую величину тока.

Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя равен КПД $\eta = P_2/P_1$, так как $P_2 = P_1 - \Delta P$, где ΔP — потери энергии в двигателе. Потери энергии состоят из следующих видов потерь: механических, магнитных, электрических и добавочных. С увеличением тока электрические потери $P_{эл} = I_1^2 r_1$ увеличиваются в квадратичной зависимости. Поэтому КПД вначале возрастает и достигает максимума, а затем из-за чрезмерного возрастания электрических потерь уменьшается. Асинхронные двигатели проектируют таким образом, чтобы при номинальной нагрузке КПД и $\cos\varphi_1$ достигали максимального значения.

Пуск асинхронных двигателей. Как указывалось выше, пусковые токи неопасны для асинхронных двигателей, так как они кратковременны (составляют 1—2 с) и не успевают нагреть обмотки. Однако пусковые токи могут вызвать падение напряжения в сети. Поэтому в асинхронных двигателях мощностью свыше 38—50 кВт применяют устройства, ограничивающие пусковые токи.

При пуске трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором практически используют следующие способы пуска:

– непосредственное включение в сеть;

– понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске;

– подключение к обмотке ротора пускового реостата (для асинхронного двигателя с фазным ротором).

Прямое включение в сеть (рис. 3.12, *а*) применяют для пуска в ход асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Если при пуске $M_п < M_{ст}$, то двигатель не сможет быть запущен. Отношение моментов

$$\frac{M_п}{M_{ном}} = K_{пм} \qquad (3.34)$$

называют кратностью пускового момента. Для двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью 0,6—100 кВт стандартами установлено значение $K_{пм}$ = 1,0—2,0, а мощностью 100—1000 кВт — $K_{пм}$ = = 0,7—1,0. Увеличивать кратность пускового момента больше, чем регламентировано стандартами, нежелательно, так как это связано с увеличением активного сопротивления ротора, что ухудшает энергетические показатели асинхронного двигателя.

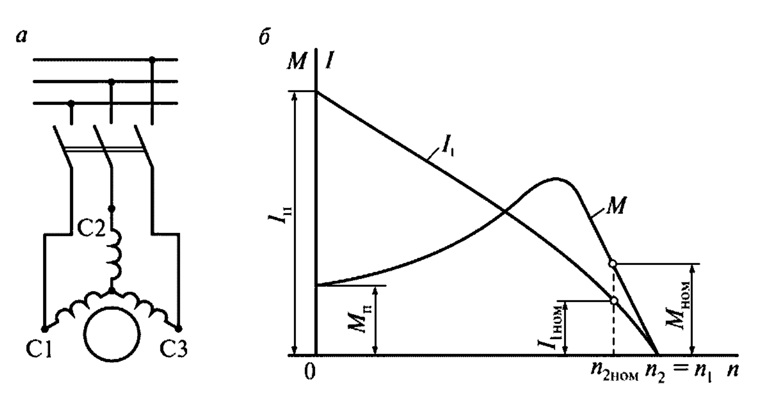


Рис. 3.12. Схема непосредственного включения в сеть (*а*) и графики изменения тока и момента (*б*)

Пусковой ток двигателя при прямом включении в сеть составляет $I_п$ = (4—7) $I_{ном}$.

Пуск двигателя переключением обмотки статора со звезды на треугольник (рис. 3.13, *а*). Переключатель ставят в положение «звезда». В этом положении обмотка статора соединена в «звезду» и фазное напряжение на статоре понижается в $\sqrt{3}$ раз. Во столько раз понижается и величина тока в фазных обмотках. При достижении ротором номинальной частоты вращения переключатель переводят в положение «треугольник», чем и заканчивается пусковая операция.

При соединении обмоток статора в «звезду» линейный ток равен фазному, а при соединении «треугольником» — больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Таким образом, включив обмотки статора в «звезду», уменьшаем величину линейного тока в $(\sqrt{3})^2 = 3$ раза. Графи-

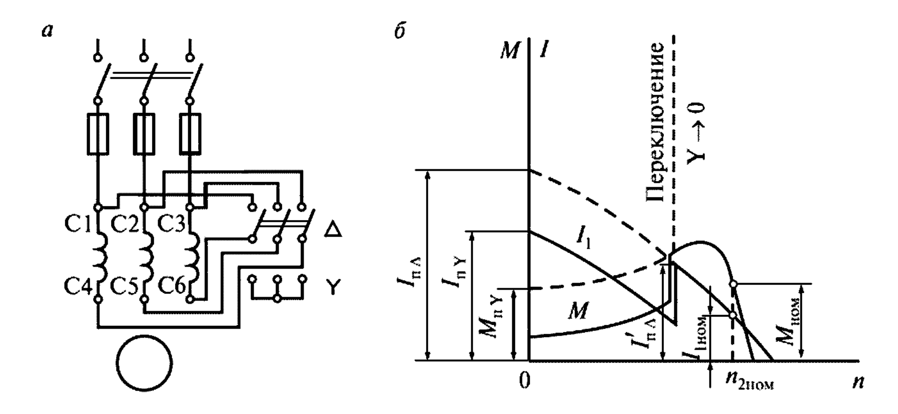


Рис. 3.13. Схема пуска асинхронного двигателя переключением со «звезды» на «треугольник» (*а*) и графики изменения момента и тока (*б*)

ки изменения момента и тока при пуске показаны на рис. 3.13, *б*. Из графиков видно, что понижение напряжения в $\sqrt{3}$ раз сопровождается уменьшением пускового момента в 3 раза, что соответствует выражению (3.26).

Реакторный пуск (рис. 3.14, *а*) уменьшает величину подаваемого напряжения на двигатель. Сначала включают рубильник *1* при разомкнутом рубильнике *2*. При этом ток из сети поступает на обмотку статора через реактор Р. Так как реактор обладает индуктив-

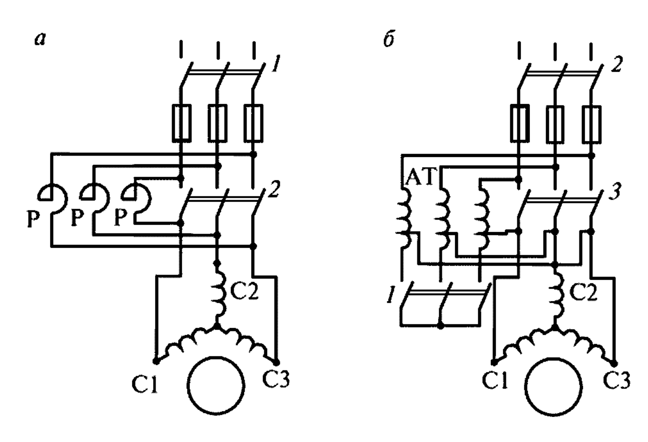


Рис. 3.14. Схемы реакторного (*а*) и автотрансформаторного (*б*) способов пуска асинхронного двигателя

ным сопротивлением, то на нем образуется падение напряжения и на асинхронный двигатель будет поступать пониженное напряжение. После разгона ротора двигателя шунтируют реактор включением рубильника *2* и на двигатель будет поступать номинальное напряжение.

Понижение напряжения автотрансформатором (рис. 3.14, *б*). Применение автотрансформатора позволяет получить бóльшую величину пускового момента, чем в случае использования реактора с индуктивным сопротивлением при одинаковых токах на линии. При пуске с помощью автотрансформатора требуется понижение напряжения автотрансформатором только в 1,5—2 раза, что приводит к уменьшению пускового момента в 2—4 раза. Недостатком этого способа является высокая стоимость аппаратуры.

Регулирование частоты вращения изменением напряжения. При изменении подводимого напряжения к двигателю изменяется электромагнитный момент двигателя пропорционально U^2 и соответственно изменяются механические характеристики (рис. 3.15, *а*), в результате чего изменяются также значения рабочих скольжений s_{min} и s_{max}, при одном и том же статическом моменте сопротивления $M_{ст}$. Диапазон регулирования частоты вращения ограничен значением критического скольжения и возможной утратой двигателя перегрузочной способности, которая пропорциональна квадрату напряжения сети. Подводимое напряжение чаще всего регулируют автотрансформатором, иногда реактором.

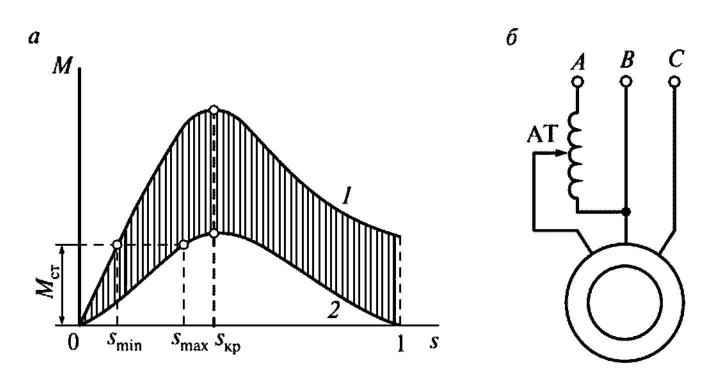


Рис. 3.15. Механическая характеристика асинхронного двигателя при изменении напряжения (*а*) и схема включения (*б*):
1, *2* — кривые, ограничивающие область изменения характеристики

При нарушении симметрии подводимого трехфазного напряжения (рис. 3.15,*б*) к двигателю вращающееся магнитное поле статора становится эллиптическим, при этом поле приобретает обратную составляющую (встречное поле), которая создает момент $M_{обр}$, направленный встречно вращающемуся моменту M. Это приводит к уменьшению результирующего вращающегося момента. Недостатком этого способа регулирования частоты вращения является узкая зона регулирования и несимметрия напряжения.

Изменять частоту вращения можно с помощью *автотрансформатора* (рис. 3.16, *а*), который включен в линейные провода между сетью и обмоткой статора.

Регулировать напряжение питания можно также с помощью *дросселя насыщения* (рис. 3.16, *б*). Рабочие обмотки дросселя РО создают в цепи питания двигателя индуктивное сопротивление, благодаря которому уменьшается величина напряжения, подводимого к двигателю. В то же время с уменьшением тока в обмотке управления (ОУ) сопротивление дросселей возрастает, что приводит к снижению напряжения на двигателе и, следовательно, к уменьшению частоты вращения.

Тиристорным регулятором напряжения ТРН (рис. 3.17) можно изменять величину напряжения, подводимого к двигателю, при неизменной частоте f тока. Управление осуществляется блоком системы импульсно-фазового управления (СИФУ). При такой системе уп-

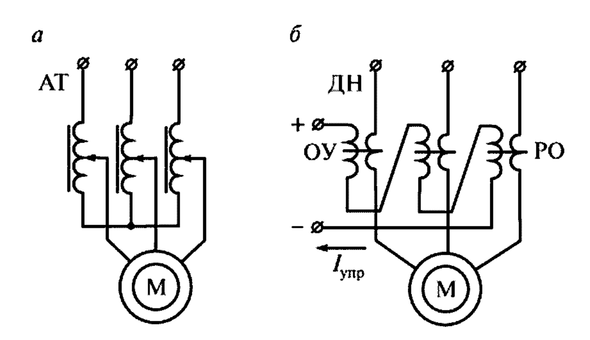


Рис. 3.16. Регулирование частоты вращения ротора асинхронного двигателя изменением напряжения питания:
а — схема автотрансформаторного пуска; *б* — схема пуска с помощью дросселей насыщения

равления не требуется контакторов, включающих асинхронный двигатель, все эти функции выполняет ТРН.

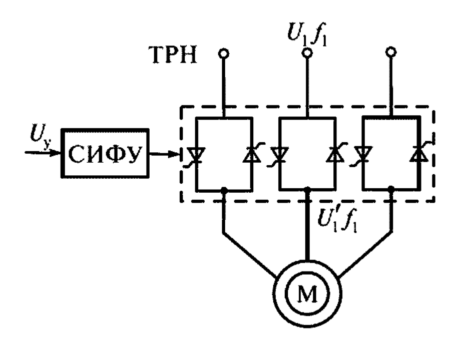


Рис. 3.17. Тиристорный регулятор напряжения

Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов *p* применяют реже, так как данный способ обеспечивает только ступенчатое регулирование частоты вращения, потому что *p* может быть только целым числом. Так, при частоте тока 50 Гц и p = 1—4 пар полюсов можно получить следующие синхронные частоты вращения: 3000, 1500, 1000, 750 об/мин.

Для изменения числа пар полюсов необходимо, чтобы в пазы статора были уложены независимые обмотки с различными значениями *p* либо при одной обмотке статора имелась бы возможность изменения ее схемы соединений. В первом случае заметно увеличиваются габариты и массы двигателей, но при этом возможно практически любое соотношение чисел пар полюсов обмоток. Как правило, такие двигатели выполняются с двумя обмотками с соотношением чисел пар полюсов от 3:1 до 12:1.

Переключение обмоток статора с четырехполюсной на двухполюсную показано на рис. 3.18. Две последовательно соединенные катушки образуют четыре полюса (рис. 3.18, *а*), при этом если катушки соединить последовательно, но встречно, то получим

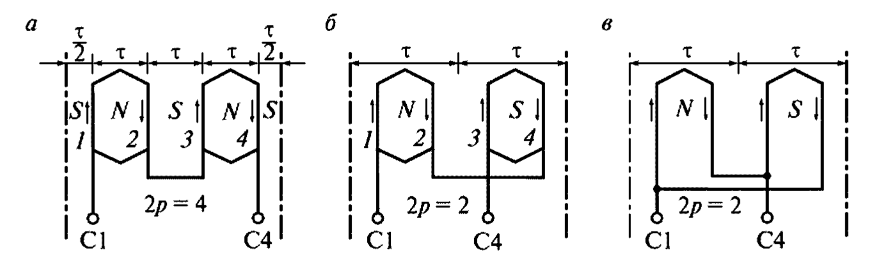


Рис. 3.18. Принципиальная схема переключения обмотки одной фазы статора на разное число полюсов:
а — при $2p = 4$; *б*, *в* — при $2p = 2$

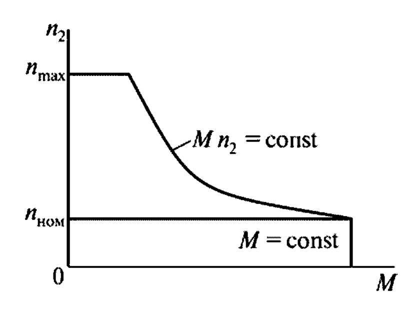


Рис. 3.19. Механическая характеристика тягового асинхронного двигателя

два полюса (рис. 3.18, *б*). При параллельном соединении катушек (рис. 3.18, *в*) тоже получим два полюса. В обоих случаях частота вращения одинакова, однако условия работы двигателя и его характеристики различны.

Регулирование частоты вращения изменением f. В асинхронных тяговых электродвигателях применяют первый способ — изменение частоты питающего напряжения.

В тяговых электродвигателях требуется изменять частоту вращения и величину электромагнитного момента в широких пределах. На рис. 3.19 приведена требуемая механическая характеристика. На начальном участке механической характеристики, т.е. в период разгона ЭПС от $n = 0$ до $n_{ном}$, необходимо поддерживать постоянный момент. После этого при изменении частоты вращения от $n_{ном}$ до n_{max} следует использовать ТЭД на полную мощность, т.е. постепенно уменьшать момент двигателя с возрастанием частоты вращения, выполняя условие $M\,n = \text{const}$. Таким образом, для получения требуемой характеристики необходимо изменять не только частоту питающего напряжения, но и величину напряжения.

В 1925 г. академиком М.П. Костенко был сформулирован закон управления асинхронными двигателями при изменении частоты тока

$$\frac{U_1}{U_{1ном}} = \frac{f_1}{f_{1ном}} \sqrt{\frac{M_{ст2}}{M_{ст1}}}. \tag{3.35}$$

При $M_{ст} = \text{const}$ уравнение (3.35) принимает вид:

$$\frac{U_{1ном}}{f_{1ном}} = \frac{U_2}{f_2} - \text{const}, \tag{3.36}$$

где индексы «1» и «2» относятся к различным частотам питающего напряжения, т.е. к различным частотам вращения.

Следовательно, питающее напряжение следует изменять прямо пропорционально его частоте. При этом мощность двигате-

ля увеличивается прямо пропорционально возрастанию частоты вращения.

При необходимости поддерживают постоянной мощность электродвигателя $P = M\omega = \text{const}$, и так как частота вращения пропорциональна частоте f_1, получим уравнение

$$M_{1\text{ном}} f_{1\text{ном}} = M f_1 = \text{const}. \quad (3.37)$$

Таким образом, асинхронный двигатель может быть использован в качестве тягового электродвигателя на электровозах и электропоездах.

Тяговый электродвигатель **НТА-350** (рис. 3.20) применяется на новых электропоездах ЭН3. Его основные технические данные приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Технические данные асинхронного тягового электродвигателя НТА-350

Параметр	Режим работы	
	продолжительный	часовой
Линейное напряжение, В	1100	
Фазный ток, А	215	240
Мощность на валу, кВт	300	350
КПД, %	0,9266	0,9299
cos φ	0,775	0,807
Частота тока статора, Гц: номинальная максимальная	 72,5 129	 72,6
Частота вращения, об/мин: номинальная максимальная	 1440 2560	
Расход охлаждающего воздуха, м^3/мин	0,3	
Класс изоляции	H	
Масса электродвигателя, кг	1420	

Благодаря частотному регулированию на электропоездах этой серии впервые реализована мощность тяговых электродвигателей 350 кВт в часовом режиме на одну ось, в то время как мощность тягового электродвигателя РТ-51М в часовом режиме составляет 200 кВт. Поэтому применение тягового асинхронного электродвигателя позволило в десятивагонном электропоезде сократить число моторных вагонов с пяти до четырех.

Тяговый электродвигатель НТА-350 унифицирован для применения на электропоездах как постоянного, так и переменного тока.

У статора бескорпусное исполнение. Сердечник статора *1* (рис. 3.20) выполнен из отдельных листов электротехнической стали, спрессован и располагается между двумя литыми полукорпусами (боковинами) *3*, *24*. Снаружи сердечника расположены шесть накладок *25*, которые закреплены сваркой по торцам и вдоль пакета железа статора. Такая конструкция статора позволяет значительно уменьшить массу электродвигателя и достичь его наибольшего диаметра.

В сердечнике выполнены пазы, куда уложена трехфазная петлевая обмотка *4* с полиамидно-фторопластовой изоляцией, соединенная в «звезду». Корпусная изоляция класса Н выполнена на основе полиамидной пленки с клеящим слоем и с дополнительным крекингостойким слоем из непропитанной стеклослюдинитовой лен-

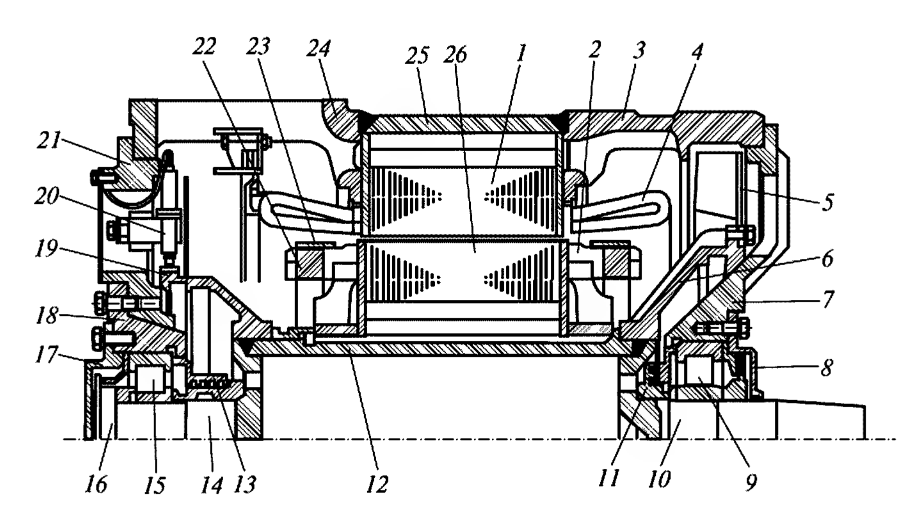


Рис. 3.20. Продольный разрез асинхронного тягового двигателя НТА-350: *1* — сердечник статора; *2* — стержень ротора; *3*, *24* — литые боковины; *4* — обмотка статора; *5* — вентиляционный диск; *6* — ступица вентилятора; *7*, *21* — подшипниковые щиты; *8* — крышка подшипника; *9*, *15* — подшипники; *10*, *14* — цапфы; *11*, *13* — лабиринтные уплотнения; *12* — барабан; *16* — упорная шайба; *17* — крышка подшипника; *18* — ступичная часть подшипникового щита; *19* — зубчатое колесо; *20* — считывающий элемент; *22* — короткозамкнутое кольцо; *23* — бандажное кольцо; *25* — стальная накладка; *26* — сердечник ротора

ты. Собранный статор пропитывают кремнийорганическим лаком КО-916К. Выводы обмотки статора выведены в коробку выводов.

Обмотка ротора короткозамкнутая, выполнена медными прямоугольными стержнями *2*, которые уложены в закрытые пазы сердечника ротора *26*. Стержни соединены с кольцами *22* сваркой или пайкой серебросодержащими припоями. Вал — пустотелый и состоит из цилиндрической средней части (барабана) *12* и приваренных к ней цапф *10*, *14* для подшипниковых опор.

Датчик частоты вращения является важным элементом системы управления тяговым преобразователем. Датчик состоит из вращающегося зубчатого колеса *19*, установленного на втулке вала ротора, и двух цилиндрических считывающих элементов *20* (рабочего и резервного), закрепленных на внутренней стороне подшипникового щита. Считывающие элементы экранированы от электромагнитных полей обмоток стальными пластинами.

В тяговый электродвигатель встроен вентилятор, состоящий из ступицы *6* и вентиляторного колеса *5*.

3.3. Вспомогательные машины переменного тока

Асинхронные двигатели вспомогательных машин. Приводом компрессоров, вентиляторов и насосов на ЭПС переменного тока являются асинхронные двигатели тягового исполнения: АС81-6, АП81-4, АП82-4; АЭ-82-402, АОСВ72-6, ДОЖ42-2, АОМ42-2, АОММ32-4, АНЭ-2251L4. Буквы и цифры в марках означают: А — асинхронный; П — повышенный пусковой момент; С — повышенное скольжение; О — обдуваемый; Д — двигатель; Ж — железнодорожный; Э — электровозный; М — морской; В — со специальным валом. Первая цифра после букв показывает условный номер диаметра вала; вторая — такой же номер длины статора; третья — число полюсов.

Остов двигателя чаще всего выполняют чугунным, стальным литым, иногда сварным (рис. 3.21). В остове закрепляют сердечник, набранный из листов электротехнической стали — либо оксидированных, либо покрытых лаком. В пазы сердечника укладывают трехфазную обмотку, иногда однослойную, но чаще всего — двухслойную петлевую. Подшипниковые щиты двигателей — стальные. Для смазки подшипников имеется маслопровод.

Характеристики асинхронных двигателей ЭПС приведены в табл. 3.2.

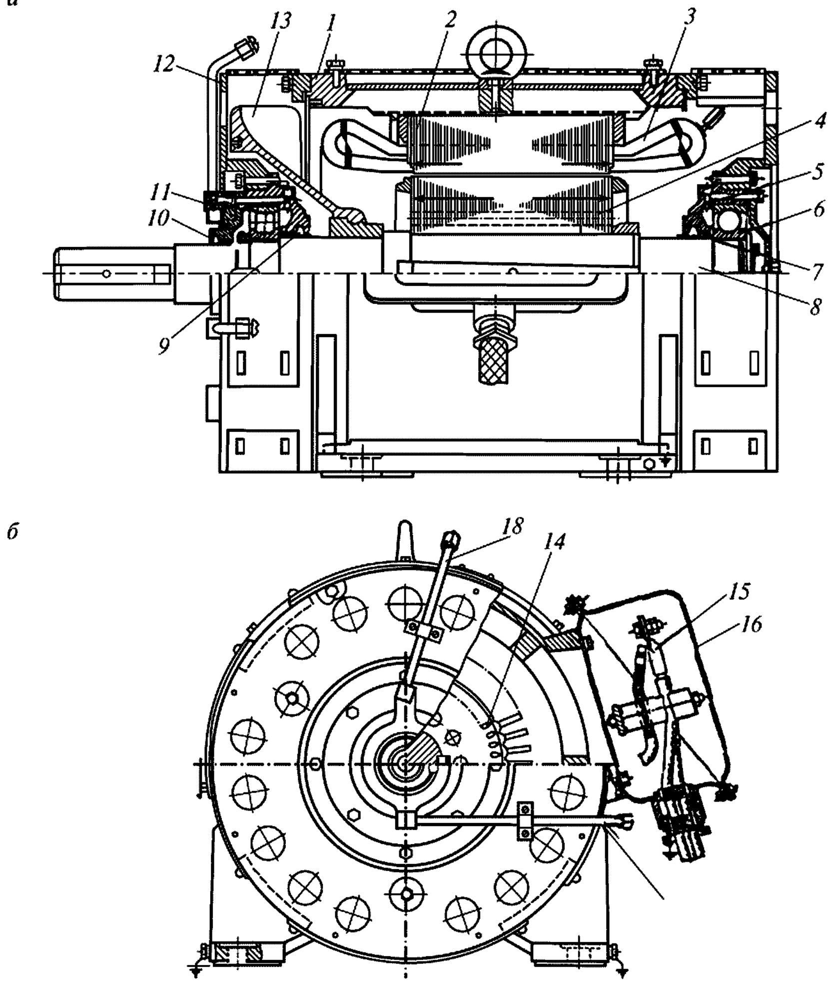


Рис. 3.21. Продольный (*а*) и поперечный (*б*) разрезы асинхронного двигателя АЭ92-4:

1 — корпус; *2* — сердечник статора; *3* — обмотка статора; *4* — ротор; 5 — внутренняя крышка; *6*, *11* — подшипники; *7*, *9*, *10* — уплотнения; *8* — вал; *12* — подшипниковый щит; *13* — вентилятор; *14* — стержень ротора; *15* — вывод; *16* — коробка выводов; *17*, *18* — маслопроводы

Таблица 3.2

Характеристики асинхронных двигателей электроподвижиого состава

Параметр	Тип двигателя					
	АП82-4	АЭ92-402	548А	АОСВ-72-4	АС82-6	АНЭ-2551L4
Серия ЭПС	ВЛ60^к	ВЛ80^р, ВЛ80^т, ВЛ80^с	ЭР9М, ЭР-9Р	ЭР-9П	ВЛ60^к	ВЛ85, ВЛ65, 2ЭП5К, 3ЭП5К, ЭП1
Мощность, кВт	55	40	5	14	25	55
Номинальное напряжение, В	380	380	220/380	220/380	380	380
Частота вращения, об/мин	990	1425	975	900	925	1430
КПД, %	90,5	85,5	80	80	84	88,0
Масса, кг	400	400	310	447	360	375

Сердечник ротора, так же как и сердечник статора, состоит из отдельных пластин электротехнической стали. В сердечнике вырезаны пазы, куда заливают сплав, состоящий из 96 % силумина и 4 % меди. Короткозамкнутые кольца, находящиеся с обеих сторон сердечника ротора, отлиты вместе с вентиляционными лопатками. Вал ротора опирается на подшипники, которые помещены в подшипниковые щиты. Внутри двигателя воздух охлаждает передние лобовые части обмотки статора, затем разделяется на два параллельных потока: первый проходит между наружной поверхностью сердечника статора и обшивкой корпуса, второй — через вентиляционные отверстия сердечника ротора. На корпусе находится коробка выводов и рым-болт для подъема двигателя.

Расщепитель фаз предназначен для преобразования однофазного переменного тока в трехфазный и питания вспомогательных трехфазных двигателей переменного тока электровозов и электропоездов переменного тока. Расщепители фаз могут быть синхронными и асинхронными, наибольшее распространение получили асинхронные расщепители фаз, представляющие собой трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

При включении трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть возникает переменное синусоидальное пульсирующее магнитное поле, которое, в отличие от вращающегося магнитного поля, не создает пускового электромагнитного момента.

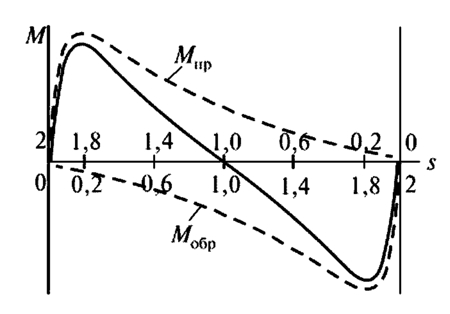


Рис. 3.22. Механические характеристики асинхронного двигателя при наличии обратной составляющей вращающегося магнитного поля

Пульсирующее магнитное поле можно разложить на две составляющие, вращающиеся в противоположных направлениях, каждая из которых создает свой пусковой вращающий момент. Результирующий пусковой момент будет равен нулю (рис. 3.22). Такое представление о пульсирующем поле справедливо для неподвижного ротора. Однако если ротору двигателя принудительно придать некоторую частоту вращения, то он будет продолжать вращаться. В этом случае поле вращающегося ротора будет гасить составляющую магнитного потока статора, направленную встречно. Другая составляющая поля статора вращается в одном с ротором направлении, как у обычного асинхронного двигателя, и поддерживает его вращение. Так как однофазные асинхронные двигатели не развивают начального пускового момента и у них плохо используется мощность, то их не применяют для привода вспомогательных механизмов электровоза или электропоезда, однако их принцип действия используется в расщепителях фаз.

На электровозах ВЛ60^{к} применен расщепитель фаз НБ-455, а на электровозах ВЛ80^{к}, ^{т}, ^{р}, ^{с} — расщепитель фаз НБ-455А, причем расщепитель НБ-455 выполнен с генератором управления, а НБ-455А — без него. В остальном конструкция обоих расщепителей фаз одинакова.

Обмотки статора расщепителя фаз одинаковы и соединены в трехфазную несимметричную «звезду» (рис. 3.23). Две фазы «звезды» С1—М2 и М—С2 составляют двигательную обмотку, а третья фаза С3—С4 — так называемую генераторную фазу. Вначале эту обмотку используют для запуска расщепителя фаз. Двигательная обмотка подключена к обмотке собственных нужд тягового трансформатора, а генераторная обмотка создает третью фазу и подключена к двигательной обмотке, но не в нулевой точке М, а в точке М2, обеспечивающей наилучшую симметрию напряжений.

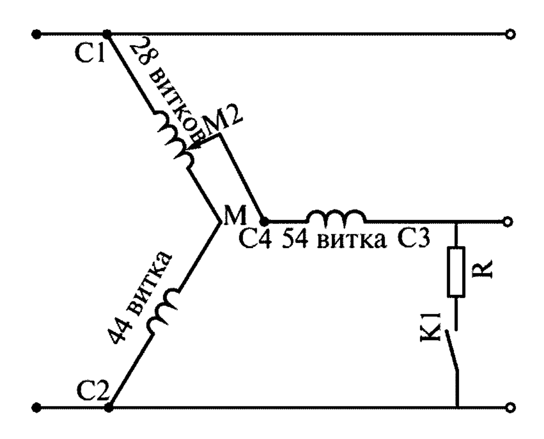


Рис. 3.23. Схема соединения обмоток расщепителя фаз

При включении двигательных обмоток расщепителя фаз на однофазное напряжение трансформатора замыкают контактор K и генераторная обмотка получает питание по цепи, проходящей через пусковой резистор R.

По двигательной обмотке протекает однофазный ток и в магнитной системе машины создается магнитный поток, но, как указывалось выше, в однофазном двигателе создается не вращающееся магнитное поле, а пульсирующее. Для получения сдвига фаз между токами двигательной и генераторной обмоток (генераторная обмотка при пуске в ход выполняет функции пусковой) включают активное сопротивление. Ток генераторной обмотки оказывается сдвинутым по фазе на некоторый угол по сравнению с токами в двигательных обмотках, и этого сдвига оказывается достаточно для разгона расщепителя фаз без нагрузки при отключенных вспомогательных двигателях. Когда частота вращения ротора достигнет 1430 об/мин, сработает реле оборотов и отключит контактор K. После отключения контактора расщепитель фаз работает как однофазный асинхронный двигатель на холостом ходу. Вращающееся магнитное поле, созданное двигательной обмоткой и ротором, пересекает витки генераторной обмотки, наводя в ней ЭДС. Так как генераторная обмотка сдвинута в пространстве относительно двигательных обмоток на угол 120°, то ЭДС генераторной обмотки будет сдвинута на этот же угол. Напряжения на генераторной и двигательной обмотках образуют трехфазную систему, к которой подключают трехфазные асин-

хронные вспомогательные машины. При симметричной нагрузке от генераторной фазы расщепителя потребляется $^1/_3$ всей мощности вспомогательных машин, а при несимметричной нагрузке линейные токи трехфазной системы различны. Суммарная мощность нагрузки в этом случае равна сумме мощностей трех фаз.

Чтобы обеспечить симметрию трехфазного напряжения при несимметричных падениях напряжения в отдельных фазах обмотку статора выполняют несимметричной с разным количеством витков. Так, обмотка С2М имеет 44 витка; С3—С4 — 54 витка; С1—М2 — 28 витков. Все обмотки уложены в 60 пазах сердечника статора. Генераторную обмотку подключают к точке, соответствующей наилучшей симметрии напряжения на выходе расщепителя фаз при определенной нагрузке.

Корпус расщепителя фаз — чугунный, литой (рис. 3.24). В него впрессован сердечник статора 7, выполненный из отдельных листов электротехнической стали. В сердечнике выполнены пазы, ку-

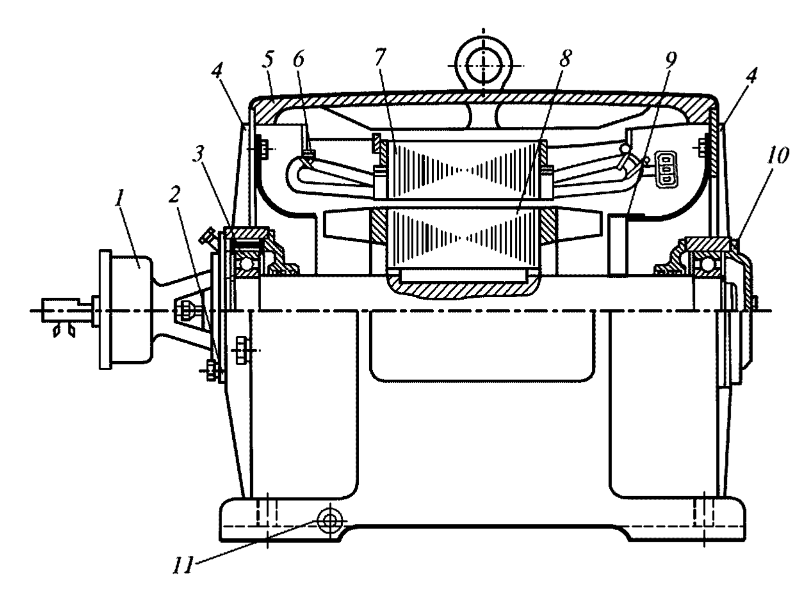


Рис. 3.24. Разрез расщепителя фаз НБ-455А:
1 — реле оборотов; *2*, *10* — крышки подшипника; *3* — подшипник; *4* — подшипниковые щиты; *5* — корпус; *6* — обмотка статора; *7* — сердечник статора; *8* — сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; *9* — вентилятор; *11* — болт заземления

да уложена трехфазная обмотка *6* с изоляцией класса В. На вал ротора *8* напрессован сердечник, также выполненный из отдельных листов электротехнической стали, в пазах которого расположена алюминиевая обмотка типа «беличье колесо». Вал ротора опирается на подшипники *3*, помещенные в щиты *4*.

Расщепитель фаз РФ-1Д питается напряжением 220 В, которое подводится к фазам *А* и *С*. При пуске между фазами *А* и *В* включается пусковой резистор $R_п$ с сопротивлением 0,42 Ом, который отключается после разгона. Остов расщепителя — стальной, литой, имеет четыре выступа для крепления расщепителя под кузовом вагона. В остов запрессован сердечник статора *1* (рис. 3.25), дополнительно закрепленный шпонками и набранный из отдельных изолированых лаком листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. В сердечнике сделаны пазы, куда уложена трехфазная обмотка и закреплена текстолитовыми клиньями. Лобовые части переплетают стеклолентой. Катушки между собой изолируют стеклоэскапоновой лакотканью и электрокартоном, а между фазами — гибким миканитом. Статор с обмотками пропитывают в термореактивном лаке с высокой температурой запекания.

Сердечник ротора набирают из отдельных пластин горячекатаной электротехнической стали толщиной 0,5 мм и закрепляют на валу с обеих сторон нажимными шайбами. В листах имеются круглые отверстия для вентиляции ротора и пазы для короткозамкнутой обмотки. Обмотка ротора — двойная. Стержни «беличьей клетки» выполнены из меди и алюминия и соединяются между собой кольцами. Верхняя «беличья клетка» — пусковая, нижняя — рабочая.

На вал ротора напрессовывают втулку, к которой болтами крепят центробежный вентилятор. Охлаждающий воздух проходит через вентиляционный патрубок, машину и выбрасывается наружу через специальные люки в заднем подшипниковым щите. Передний подшипниковый щит — усиленный. Это вызвано установкой рабочего вентиляционного колеса для систем вентиляции выпрямительной установки и сглаживающего реактора.

***Асинхронный электродвигатель* АНЭ-1272251L4** (рис. 3.26) предназначен для привода компрессоров и вентиляторов электровозов, а также для использования в качестве расщепителя фаз. При но-

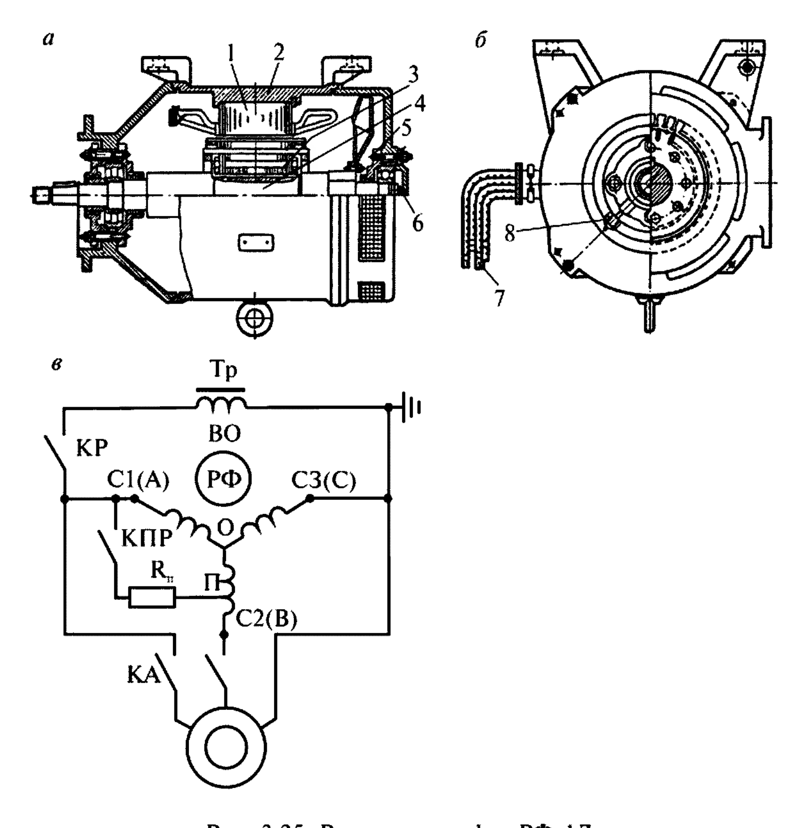


Рис. 3.25. Расщепитель фаз РФ-1Д:

а — продольный разрез; *б* — вид сбоку; *в* — схема включения обмоток статора: *1* — сердечник статора; *2* — остов; *3* — сердечник ротора; *4* — вал; *5*, *6* — крышки; *7* — выводы; *8* — масленка; Тр — тяговый трансформатор; ВО — вспомогательная обмотка; РФ — расщепитель фаз; Д — асинхронный двигатель

минальном напряжении электродвигателя 380 В допускается колебание напряжения от 280 до 470 В.

Конструктивно асинхронный двигатель состоит из следующих основных частей: статора, ротора, двух подшипниковых узлов и коробки выводов. Статор *11* состоит из стального сварного корпуса и сердечника, набранного из листов электротехнической стали 2212, изолированных друг от друга лаком. В сердечнике выполнены открытые пазы, куда уложена двухслойная обмотка из прямоугольного медного провода с изоляцией класса Н. Пазовая изо-

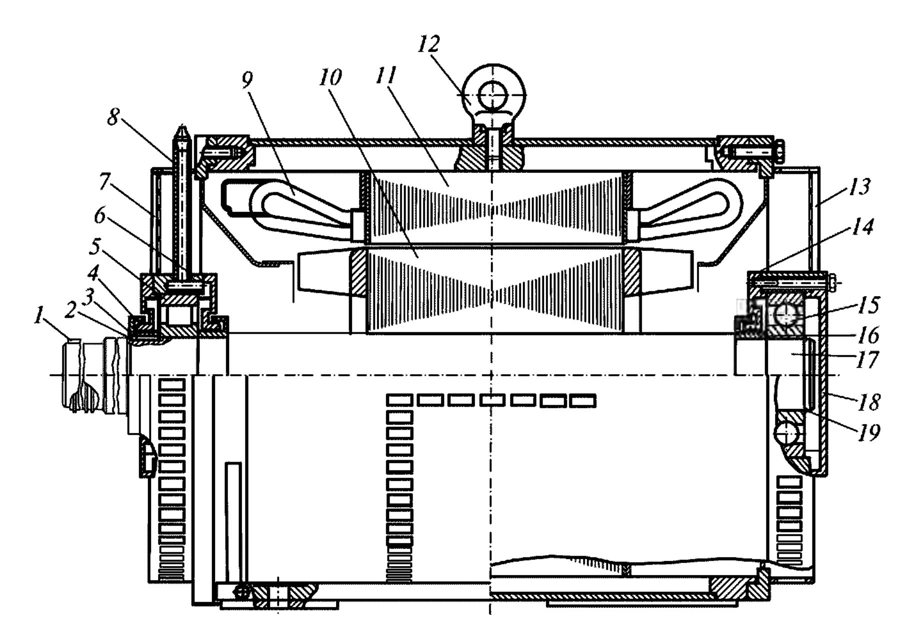


Рис. 3.26. Продольный разрез электродвигателя АНЭ-2251L4:
1 — наружная шпонка; *2* — пружинное кольцо; *3* — внутренняя шпонка; *4* — уплотнительное кольцо; *5* — подшипник; *6, 14* — крышки подшипников; *7, 13* — подшипниковые щиты; *8* — масленка; *9* — обмотка статора; *10* — ротор; *11* — статор; *12* — рым-болт; *15* — подшипник; *16* — лабиринтное уплотнение; *17* — вал; *18* — крышка; *19* — упорное кольцо

ляция состоит из двух слоев гибкого слюдинита ГСС-1 толщиной 0,2 мм, между которыми помещен один слой электрокартона толщиной 0,2 мм. Лобовые части обмотки изолированы по всей длине стеклолентой в полуперекрышу.

Ротор состоит из вала *17*, на который напрессован сердечник ротора *10*, выполненный из отдельных пластин электротехнической стали 2212. Крайние пластины имеют бóльшую толщину и предотвращают распушение сердечника. Обмотка ротора — короткозамкнутая, литая, из алюминиевого сплава. Ротор балансируется динамически.

***Электронасос* 4ТТ-63/10** предназначен для перекачивания нагретого трансформаторного масла из бака в систему охлаждения силового трансформатора ЭПС.

Технические данные электронасоса приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Технические характеристики электронасоса 4ТТ-63/10

Параметр	Значение
Мощность, кВт	2,8
Подача, м^3/ч	63
Напор, МПа	10^{-4}
Температура масла, °С	От –15 до +85
Частота вращения, об/мин	1500
Давление, МПа	От 0,6 до 5
КПД, %	55
Масса незаполненного электронасоса, кг	105
Напряжение питающей сети, В	220/380
Номинальный ток, А, при напряжении 220 В 380 В	 12,9 7,5
Сопротивление изоляции обмотки относительно корпуса, МОм	5

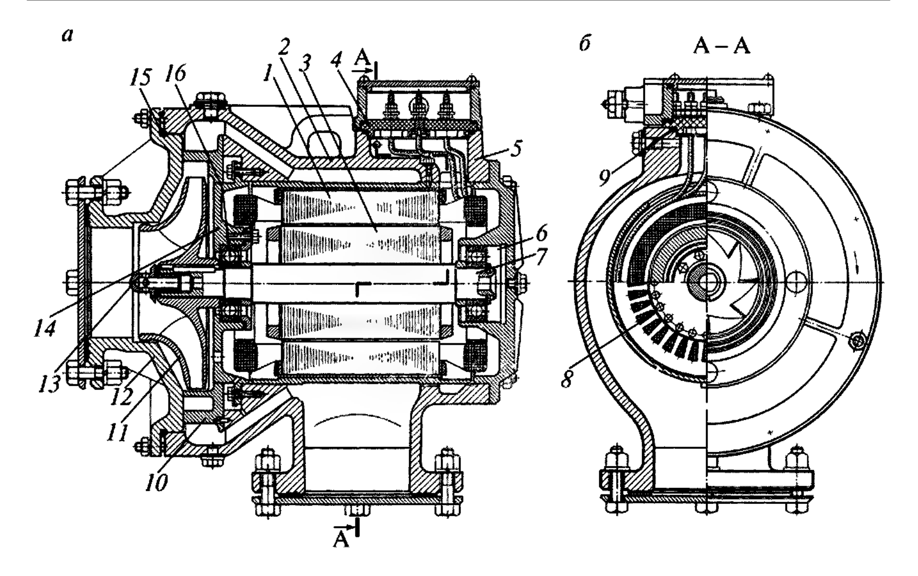


Рис. 3.27. Продольный (*а*) и поперечный (*б*) разрезы электронасоса 4ТТ63/10: *1* – статор; *2* — корпус; *3* — ротор; *4* — коробка выводов; *5*, *14* — подшипниковые щиты; *6*, *16* — якорные подшипники; *7* — вал; *8* — обмотка статора; *9* — панель выводов; *10* — направляющий аппарат; *11* — рабочее колесо; *12* — всасывающий патрубок; *13* — обтекатель; *15* — уплотнительное кольцо

Электронасос (рис. 3.27) представляет собой агрегат, состоящий из трехфазного асинхронного двигателя и одноступенчатого центробежного насоса; он содержит: корпус, всасывающий и нагнетательный патрубки, короткозамкнутый ротор с рабочим колесом, направляющий аппарат, сердечник статора с трехфазной обмоткой и коробку выводов.

Нагретое масло из всасывающего патрубка *12* поступает на рабочее колесо *11*, которое его закручивает, после чего масло попадает в направляющий аппарат *10* и далее в нагнетательный патрубок.

При техобслуживании насоса производят его внешний осмотр, проверяют отсутствие течи масла и состояние заземления.

3.4. Синхронные машины

Синхронные машины, как и все электрические машины, являются обратимыми, т.е. они могут работать и в режиме генератора, и в режиме двигателя. Синхронные генераторы вырабатывают электрическую энергию трехфазного тока. Почти все генераторы переменного тока, устанавливаемые на тепловых, атомных и гидравлических электростанциях, являются синхронными. Мощность современных синхронных генераторов достигает 1500 МВ·А. На ТПС синхронные генераторы применяют в качестве тяговых на тепловозах с переменно-постоянной и переменно-переменной передачами. Тяговые синхронные генераторы тепловозов приводятся во вращение дизелем, выработанная ими электроэнергия потребляется тяговыми электродвигателями. На ЭПС синхронный генератор применен в качестве генератора управления на электровозе ВЛ-82$^{\text{М}}$.

Синхронные двигатели применяются в устройствах, где требуется постоянная частота вращения. Частота вращения ротора синхронных двигателей является постоянной и не зависит от нагрузки.

Важной особенностью синхронных машин является их способность работать с $\cos\varphi = 1$ и даже с опережающим $\cos\varphi$. Это позволяет компенсировать реактивные (индуктивные) токи не только от самой синхронной машины, но и от других потребителей энергии, например от асинхронных двигателей.

Устройство. В синхронных машинах якорь может быть неподвижным или вращающимся. Машины большой и средней мощ-

ности (рис. 3.28) выполняют с неподвижным якорем для удобства отвода электрической энергии от обмотки якоря или ее подвода к ней. Так как мощность возбуждения невелика, то обмотки возбуждения *3* с наконечниками полюсов *4* проще расположить на роторе. Ток возбуждения подают посредством щеток, которые помещены в щеткодержатели *2* и контактируют с контактными кольцами *1*. В сердечнике статора *5* выполнены пазы, куда уложена трехфазная обмотка. На валу *7* ротора расположен вентилятор *6*.

В машинах с неподвижным якорем применяют две различные конструкции ротора: явнополюсные (рис. 3.29, *а*) и неявнополюсные (рис. 3.29, *б*). Явнополюсной ротор обычно используют в машинах с четырьмя и бóльшим числом полюсов. Обмотку возбуждения в этом случае выполняют в виде цилиндрических

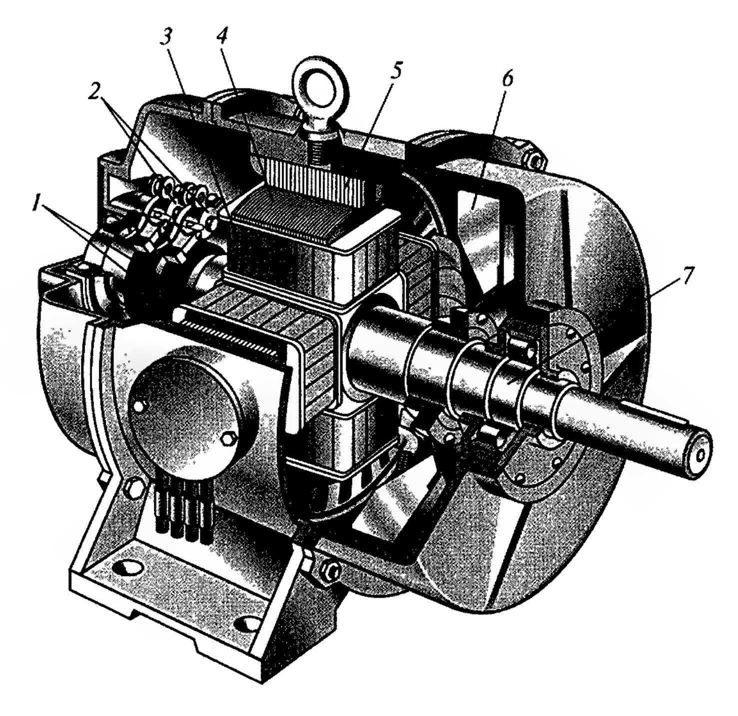


Рис. 3.28. Синхронная машина:
1 — контактные кольца; *2* — щеткодержатели; *3* — полюсная катушка; *4* — полюсный наконечник; *5* — сердечник статора; *6* — вентилятор; *7* — вал

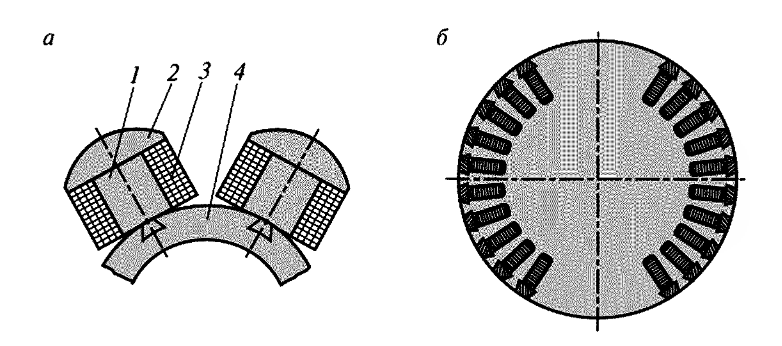


Рис. 3.29. Конструкция роторов синхронных машин:
а — с явно выраженными полюсами; *б* — с неявно выраженными полюсами

катушек *3*, которые размещены на сердечнике *1* с полюсными наконечниками *2*. Все полюса ротора размещены на ободе *4*, являющемся также и ярмом магнитной системы машины, в котором замыкаются магнитные потоки полюсов. Явнополюсные роторы применяют в тяговых генераторах тепловозов. Неявнополюсные роторы применяют в быстроходных генераторах, таких как турбогенераторы. Для получения стандартной частоты 50 Гц они должны иметь при двух полюсах — 3000 об/мин, а при четырех — 1500 об/мин.

Принцип действия синхронного генератора. Ток возбуждения, протекающий по обмоткам главных полюсов ротора, создает основной магнитный поток Ф. При вращении ротора с частотой n_1 его магнитный поток Ф будет пересекать проводники статора и индуктировать в них ЭДС. Так как обмотки статора расположены под углом 120° друг к другу, то ЭДС будет трехфазной. Частота ЭДС при этом составляет

$$f_1 = pn_1/60. \tag{3.38}$$

Если к обмоткам статора подключить симметричную нагрузку $Z_н$, то возникает симметричная система токов, которая вызовет появление вращающегося магнитного поля.

Способы возбуждения. Для возбуждения синхронных машин необходимо к кольцам, расположенным на роторе, подключить источник постоянного тока. В системе электромагнитного возбуждения

источником постоянного тока является возбудитель — генератор постоянного тока независимого или параллельного возбуждения. Возбудитель вырабатывает постоянный ток, который через щетки и контактные кольца подается на обмотки возбуждения полюсов, расположенные на роторе синхронной машины. Чаще всего вал синхронной машины и вал возбудителя соединены между собой.

В крупных синхронных машинах применяют возбудители и подвозбудители (рис. 3.30, *а*).

В качестве возбудителя используют генератор постоянного тока независимого возбуждения. Для питания его обмоток возбуждения ОВ применяют генератор постоянного тока — подвозбудитель ПВ. Все три машины — синхронный генератор, возбудитель и подвозбудитель — располагают на одном валу. Нагрузкой подвозбудителя является обмотка возбуждения возбудителя, а возбудитель питает обмотку возбуждения синхронного генератора. Для регулирования тока возбуждения применяют регулировочные реостаты (r_1) возбудителя и подвозбудителя (r_2).

В настоящее время широкое распространение получила система *бесконтактного* возбуждения, при которой выпрямитель закреплен на валу синхронного генератора и вращается вместе с ним. В этом случае не требуется контактных колец и щеток (рис. 3.30, *б*). В этой системе в качестве возбудителя применен синхронный генератор с трехфазным якорем *2*, расположенным на роторе, а обмотка возбуждения *1* полюсов — на статоре и получает питание от подвозбудителя ПВ — генератора постоянного тока параллельного возбуж-

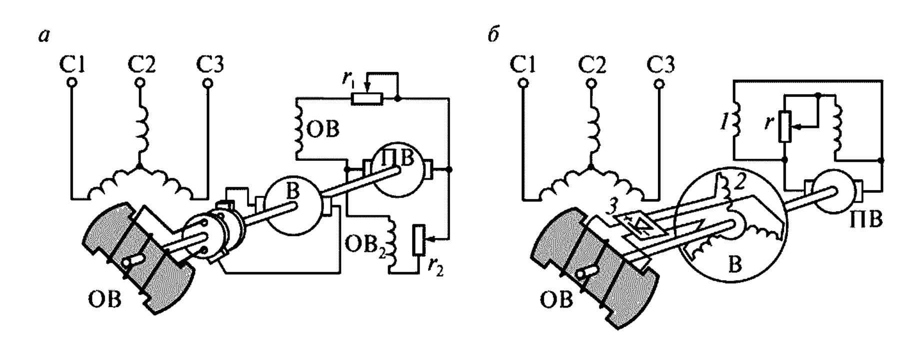


Рис. 3.30. Контактная (*а*) и бесконтактная (*б*) системы возбуждения синхронных машин

дения. Так как возбудитель является генератором переменного тока, а обмотку возбуждения синхронного генератора необходимо питать постоянным током, то на выходе обмотки якоря возбудителя включен полупроводниковый преобразователь *3*, закрепленный на валу синхронной машины и вращающийся вместе с обмоткой возбуждения синхронного генератора. В такой системе возбуждения отсутствует скользящий контакт в цепи возбуждения синхронной машины, что позволяет повысить ее надежность и увеличить КПД.

При *самовозбуждении* (рис. 3.31) часть мощности, необходимой для возбуждения, отбирается от обмотки статора этого же генератора и через понижающий трансформатор и выпрямительный полупроводниковый преобразователь (ПП) поступает через щетки и контактные кольца к обмотке возбуждения синхронного генератора.

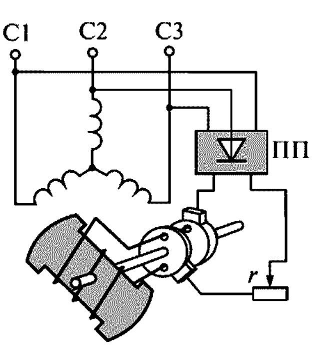


Рис. 3.31. Схема самовозбуждения синхронных машин

На возбуждение синхронных машин затрачивается мощность, составляющая от 0,2 до 5 % полезной мощности. В машинах малой мощности применяют принцип возбуждения постоянными магнитами, которые располагают на роторе. В этом случае конструкция машины упрощается и становится более экономичной и надежной.

Реакция якоря синхронной машины. При работе синхронной машины по обмоткам возбуждения протекает ток, создавая МДС возбуждения

$$F_d = I_в w. \qquad (3.39)$$

Когда синхронная машина нагружена, то по ее обмоткам якоря, с числом витков w_1, протекает ток I_1, создавая МДС якоря:

$$F_{q1} = I_1 w_1. \qquad (2.40)$$

МДС статора (якоря) F_{q1} воздействует на МДС ротора (индуктора), усиливая или ослабляя поле возбуждения или же искажая его форму.

Воздействие МДС обмотки якоря на МДС обмотки возбуждения называют *реакцией якоря.*

Нагрузка синхронного генератора, как правило, смешанная — активно-индуктивная или активно-емкостная.

Реакция якоря синхронного генератора при активном токе нагрузки видна на рис. 3.32, *а*, где представлены статор и ротор синхронного генератора и показаны три обмотки статора, сдвинутые на угол 120° друг относительно друга, причем каждая сторона катушки занимает только по одному пазу. Ротор явнополюсной и в данный момент времени занимает вертикальное положение. Магнитный поток ротора индуктирует ЭДС E_1 в обмотках статора. Так как нагрузка активная, то ЭДС и ток совпадают. По правилу буравчика определим направление магнитных силовых линий статора. Как видно из рис. 3.32, МДС статора и ротора направлены под углом 90° друг к другу, т.е. поперек. Поэтому реакция якоря считается поперечной.

Построим ниже векторную диаграмму. Вектор F_d направим вертикально, как расположен ротор. От него под углом 90° в сторону отставания проводим вектор ЭДС E_0 статора. С вектором ЭДС при активной нагрузке совпадает ток I_1 статора. Ток I_1 создает МДС статора F_{q1}, которая совпадает с этим током.

При поперечной реакции якоря МДС статора, воздействуя на МДС ротора, искажает результирующее магнитное поле машины:

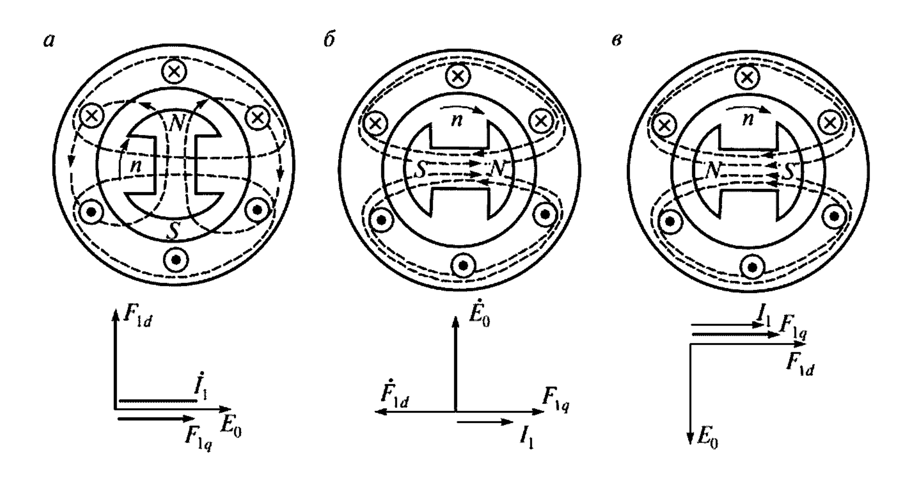


Рис. 3.32. Реакция якоря синхронного генератора при активной (*а*), индуктивной (*б*) и емкостной (*в*) нагрузках

под набегающим краем полюса поле ослабевает (магнитные силовые линии статора и ротора совпадают). Размагничивание участков зубцового слоя статора происходит беспрепятственно, а намагничивание зубцовых слоев статора и полюсных наконечников ограничивается магнитным насыщением. В итоге результирующий магнитный поток Ф уменьшается, что приводит к уменьшению ЭДС машины E_1.

При *индуктивном токе нагрузки* ЭДС E_1 статора опережает ток I_1 на угол 90°. Следовательно, ток достигает максимального значения после поворота ротора вперед на 90° относительно его положения, которое соответствовало максимуму ЭДС (рис. 3.32, *б*). МДС F_{q1} статора и МДС F_d ротора направлены встречно. Этот же результат мы получим, построив векторную диаграмму. Из диаграммы видно, что вектора МДС направлены встречно. Таким образом, при индуктивном токе нагрузки синхронного генератора реакция якоря — продольная размагничивающая.

При *емкостном токе нагрузки* ЭДС отстает от тока на угол 90°, МДС статора и ротора действуют по оси полюсов согласно рис. 3.32, *в*.

Таким образом, при емкостном токе нагрузки синхронного генератора реакция его якоря — продольная подмагничивающая. Магнитное поле не искажается.

Смешанная нагрузка. Любой нагрузочный режим можно получить посредством векторных диаграмм, накладывая их друг на друга. При активно-индуктивной нагрузке вектор F_1 отстает по фазе от вектора $\dot{E}_0$ на угол $0 < \psi < 90°$. Разложим вектор F_1 на две составляющие — продольную и поперечную составляющую МДС $F_{q1} = F_1 \cos\psi_1$.Такое же разложение МДС якоря F_1 на составляющие можно сделать в случае активно-емкостной нагрузки. Поперечная составляющая МДС статора F_{q1}, представляющая собой МДС реакции якоря по поперечной оси, пропорциональна активной составляющей тока нагрузки $I_q = I_1 \cos\psi_1$, т.е. $F_{q1} = F_1 \cos\psi_1$, а продольная составляющая МДС статора $F_{1d} = F_1 \sin\psi_1$.

Характеристики синхронных генераторов дают наглядное представление о ряде основных свойств таких генераторов. Они могут быть построены по расчетным данным с помощью векторных диаграмм или по данным соответствующих опытов.

На рис. 3.33 показана схема синхронного генератора для снятия рабочих характеристик.

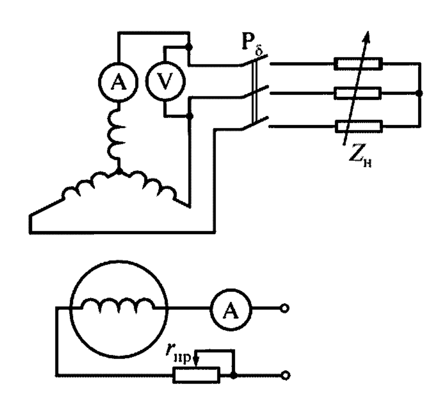


Рис. 3.33. Схема синхронного генератора

Характеристика холостого хода снимается при разомкнутом рубильнике $P_б$. При изменении сопротивления регулировочного реостата $r_{рг}$, изменяется величина тока возбуждения $I_в$. Это приводит к изменению МДС F_0, которая равна $F_0 = I_в w_в$, где $w_в$ — число витков обмотки возбуждения. Изменение МДС соответствует изменению магнитного потока Ф, индуктирующего ЭДС в обмотках статора. Следовательно, ЭДС E_1 будет изменяться пропорционально $I_в$ до насыщения.

С насыщением магнитопровода пропорциональность между E и $I_в$ нарушается (рис. 3.34, *а*). Чтобы характеристики синхронных генераторов можно было сравнить друг с другом, их строят в относительных единицах, которые помечают значком *: $E^* = f(I_в^*)$, где $E^* = E/U_{1ном}$ — относительная ЭДС фазы обмотки статора; $I_в^* = I_{в0}/I_{в0ном}$ — относительный ток возбуждения, где $I_{в0ном}$ — ток возбуждения в режиме холостого хода, соответствующий ЭДС холостого хода $E_0 = U_{1ном}$.

Для снятия *внешней характеристики* $U = f(I_1)$ (рис. 3.34, *б*) замыкают рубильник $P_б$ (см. рис. 3.33) и устанавливают номиналь-

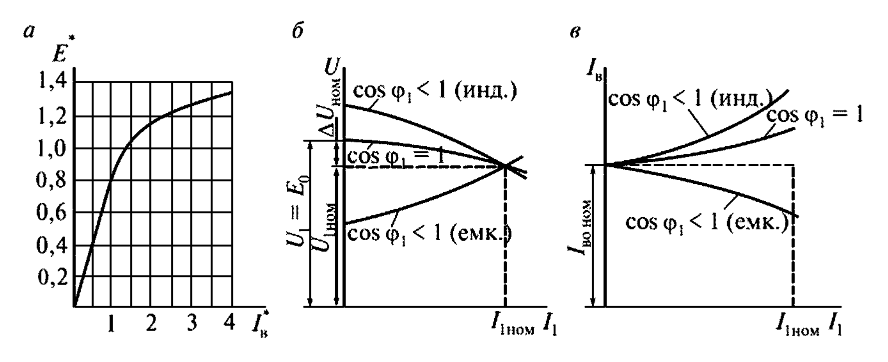


Рис. 3.34. Рабочие характеристики синхронного генератора:
а — характеристика холостого хода; *б* и *в* — внешние и регулировочные характеристики

ное напряжение $U_{1ном}$ и номинальный ток нагрузки $I_{ном}$ посредством изменения сопротивления нагрузки $Z_н$. На рис. 3.34, *б* представлены внешние характеристики, соответствующие различным по характеру нагрузкам синхронного генератора. По внешней характеристике можно судить о том, как изменится напряжение на зажимах генератора при изменении его нагрузки и отсутствии регулирования напряжения (в естественных условиях работы машины).

При активной нагрузке ($\cos\varphi = 1$) при увеличении тока нагрузки напряжение уменьшается, что объясняется падением напряжения в обмотке якоря и размагничивающим действием реакции якоря.

При индуктивной нагрузке ($\cos\varphi < 1$ инд.) при увеличении тока нагрузки уменьшение напряжения объясняется продольной размагничивающей реакцией якоря.

При емкостной нагрузке ($\cos\varphi < 1$ емк.) увеличение напряжения объясняется увеличением продольной подмагничивающей реакции якоря.

Изменение номинального напряжения (%)

$$U_{ном} = \frac{E_0 - U_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100\%. \qquad (3.41)$$

Регулировочная характеристика представляет собой зависимость $I_в = f(I)$ при $U = U_н = \text{const}$; $n = \text{const}$; $\cos\varphi = \text{const}$.

По регулировочной характеристике можно судить о том, в каких пределах необходимо изменять ток возбуждения $I_в$ при изменении тока нагрузки I, чтобы напряжение на зажимах генератора было неизменным. Регулировочные характеристики для разных значений $\cos\varphi$ показаны на рис. 3.34, *в*.

Синхронный двигатель. Его пуск. Синхронный двигатель потребляет электрическую энергию из сети и преобразует ее в механическую энергию на валу двигателя. Конструктивно синхронный двигатель выполнен так же, как и синхронный генератор. Его обмотка якоря подключена к источнику трехфазного тока, а обмотка возбуждения получает питание постоянным током от постороннего источника. От трехфазного тока в обмотке статора создается вращающееся магнитное поле, а от постоянного тока, протекающего по обмотке возбуждения, — магнитное поле полюсов ротора. Магнитные поля статора и ротора взаимодействуют между собой, вызывая появление электромагнитного мо-

мента, приводящего ротор во вращение. Однако это возможно только при предварительном вращении ротора от постороннего привода.

Пусковой момент в синхронном двигателе отсутствует. Электромагнитная сила, образующаяся при взаимодействии магнитных полей статора и ротора при частоте 50 Гц, 50 раз в секунду меняет свой знак, вследствие этого ротор не может начать вращение.

Для устранения этого недостатка на сердечник ротора накладывают дополнительную пусковую короткозамкнутую обмотку (типа «беличье колесо»).

Схема включения синхронного двигателя при пуске в ход показана на рис. 3.35, *а*. Обычно процесс пуска выполняют в такой последовательности:

– отключают обмотку возбуждения ротора от цепи постоянного тока;

– замыкают обмотку ротора на резистор, сопротивление которого в 10—15 раз превышает сопротивление самой обмотки, бла-

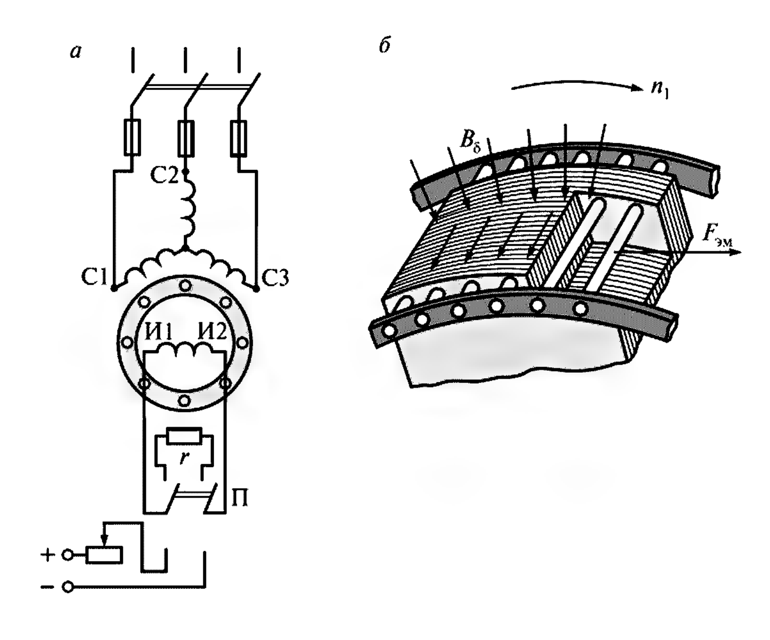


Рис. 3.35. Схема асинхронного пуска синхронного двигателя (*а*), взаимодействие токов ротора с полем статора (*б*)

годаря чему уменьшается риск пробоя обмотки возбуждения при пуске и увеличивается пусковой момент;

– подключают обмотку статора к сети при отключенной механической нагрузке. Двигатель начинает вращаться как асинхронный (рис. 3.35, *б*);

– при достижении ротором частоты вращения, близкой к синхронной (обычно $n_2 = 0{,}95\ n_{\text{синхр}}$), обмотку возбуждения подключают к цепи постоянного тока;

– к валу ротора прикладывают механическую нагрузку.

Чем меньше нагрузка на валу двигателя, тем легче произвести его пуск в ход. Однако при асинхронном пуске синхронного двигателя возникают значительные пусковые токи, достигающие пяти или семикратного значения (по сравнению с номинальным током). Поэтому пуск в ход осуществляют при достаточной мощности сети или применяют способы ограничения пусковых токов, рассмотренных при пуске в ход асинхронного двигателя.

Рабочие характеристики синхронного двигателя представляют собой зависимость частоты вращения ротора n_2, потребляемой мощности P_1, полезного момента M_2, коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ и тока в обмотке статора I_1 от полезной мощности двигателя P_2 (рис. 3.36).

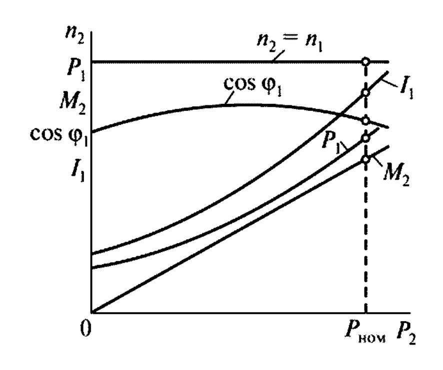


Рис. 3.36. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Частота вращения ротора n_2 всегда равна синхронной частоте вращения магнитного поля $n_1 = 60f/p$, вследствие этого график $n_2 = f(P_2)$ имеет вид прямой линии, параллельной оси абсцисс.

Зависимость коэффициента мощности $\cos\varphi_1 = f(P_2)$ представляет собой кривую, зависящую от настройки тока возбуждения: если в режиме холостого хода ток возбуждения установлен таким, что $\cos\varphi_1 = 1$, то при увеличении нагрузки $\cos\varphi_1$ снижается. Если же при номинальной нагрузке установить $\cos\varphi_1 = 1$, то при недогрузке двигатель будет забирать из сети реактивный опережающий ток, а при перегрузке — отстающий. Поэтому устанавлива-

ют ток возбуждения таким, чтобы $\cos \varphi_1 = 1$ при средней нагрузке. В этом случае при изменении нагрузки в небольших пределах $\cos \varphi_1$ останется достаточно высоким. Чаще всего устанавливают ток в обмотке возбуждения синхронного двигателя таким, чтобы $\cos \varphi_1 = 1$ был при нагрузке несколько превышающей номинальную. В этом случае при номинальной нагрузке $\cos \varphi_1 \approx 0{,}8$ и синхронный двигатель будет потреблять из сети опережающий по отношению к напряжению сети ток, что приведет к повышению коэффициента мощности этой сети.

Полезный момент на валу синхронного двигателя $M_2 = P_2/\omega_1$. Так как рабочие характеристики снимают при $f_1 = \text{const}$, то график $M_2 = f(P_2)$ имеет вид прямой линии, выходящей из начала координат.

Мощность на входе двигателя $P_1 = P_2 + \Delta P$. При увеличении нагрузки на валу двигателя увеличиваются также потери ΔP, вследствие чего потребляемая мощность растет быстрее полезной мощности P_2 и график $P_1 = f(P_2)$ имеет несколько криволинейный вид.

Достоинства и недостатки синхронных двигателей. К достоинствам синхронных двигателей относятся: строгое постоянство частоты вращения независимо от механической нагрузки на валу; меньшая, чем у асинхронных двигателей, чувствительность к колебаниям напряжения; возможность работы при $\cos \varphi = 1$. Это приводит к улучшению коэффициента мощности сети, а также к уменьшению размеров самого двигателя, так как его ток меньше тока асинхронного двигателя той же мощности. При работе с опережающим током синхронные двигатели являются генераторами реактивной (емкостной) мощности, компенсирующей реактивную (индуктивную) мощность асинхронных двигателей, благодаря чему разгружаются линии электропередачи (ЛЭП) от реактивных токов. Это позволяет передавать по ЛЭП бóльшую активную мощность.

Недостатками синхронных двигателей являются: сложность конструкции по сравнению с асинхронными, что повышает их стоимость; сравнительная сложность пуска в ход; трудности с регулированием частоты вращения. Указанные недостатки тормозят их широкое применение. Однако при мощностях, превышающих 100 кВт, когда очень выгодно иметь высокий $\cos \varphi$ и уменьшенные габариты машины, синхронные двигатели предпочтительнее асинхронных.

Контрольные вопросы

1. Какова конструкция асинхронного двигателя?
2. Каков принцип действия асинхронного двигателя?
3. Что такое скольжение и как оно определяется?
4. На какие типы подразделяют асинхронные двигатели?
5. Как осуществляется пуск в ход асинхронного двигателя?
6. В каких случаях не применяют специальные пусковые устройства?
7. Какими способами регулируют частоту вращения ротора асинхронного двигателя?
8. Как реверсируют асинхронный двигатель?
9. В каких случаях асинхронный двигатель подключают к сети «звездой» или «треугольником»?
10. От каких параметров зависит электромагнитный момент асинхронного двигателя?
11. Какими способами регулируют частоту вращения ротора асинхронного двигателя?
12. Какова конструкция тягового асинхронного двигателя?
13. Какова конструкция синхронного генератора?
14. Какова конструкция синхронного двигателя?
15. Как осуществляют пуск в ход синхронного двигателя?
16. Почему синхронные машины могут улучшать коэффициент мощности сети?

Глава 4. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатором называется электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. С помощью трансформатора понижают или повышают напряжение, изменяют число фаз и в некоторых случаях могут изменять частоту переменного тока.

Классифицируют трансформаторы по следующим признакам:

– по назначению — силовые тяговые, силовые общего и специального назначения, сварочные, импульсные, для преобразования числа фаз и др.;

– по виду охлаждения — с воздушным и масляным охлаждением;

– по числу трансформируемых фаз — однофазные и трехфазные;

– по форме магнитопровода — стержневые, броневые, бронестержневые, тороидальные;

– по числу обмоток на фазу — однообмоточные, двухобмоточные и многообмоточные.

4.1. Силовые трансформаторы

Трансформатор (рис. 4.1) состоит из сердечника, набранного из листов электротехнической стали и двух или нескольких обмоток. Обмотка, к которой подводится переменный ток, называется первичной. К другой обмотке — вторичной — подключен потребитель $Z_н$. Все величины (ток, напряжение, ЭДС, МДС и т.д.), относящиеся ко вторичной обмотке, обозначают индексом 2.

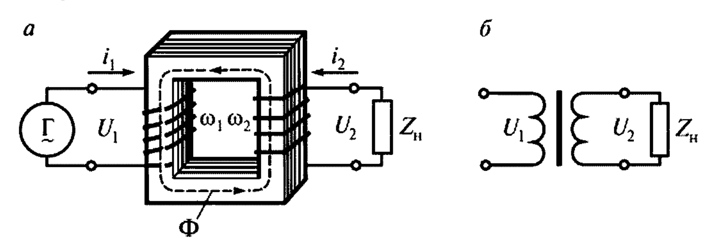


Рис. 4.1. Электромагнитная (*а*) и принципиальная (*б*) схемы трансформатора

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки трансформатора к сети с переменным синусоидальным напряжением U_1 в обмотке возникает ток I_1, который создает синусоидально изменяющийся магнитный поток Ф, замыкающийся по магнитопроводу, и, пересекая витки первичной и вторичной обмоток, индуктирует в них ЭДС. В первичной обмотке индуктируется ЭДС e_i самоиндукции:

$$e_1 = -w_1(d\Phi/dt), \quad (4.1)$$

а во вторичной обмотке индуктируется ЭДС взаимоиндукции:

$$e_2 = -w_2(d\Phi/dt). \quad (4.2)$$

Знак «–» указывает, что ЭДС e_1 и e_2 направлены против причины их вызвавшей, т.е. против изменения магнитного потока (правило Ленца). Если к вторичной обмотке подключить нагрузку $Z_н$, то по этой обмотке будет протекать ток I_2 и на ее зажимах появится некоторое напряжение U_2. Результирующий магнитный поток Ф создается токами этих обмоток. Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют *обмоткой высокого (высшего) напряжения* (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, называют *обмоткой низкого (низшего) напряжения* (НН).

При синусоидальном магнитном потоке

$$\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t, \quad (4.3)$$

где Φ_{max} — максимальное значение потока, Вб.

Подставив (4.3) в (4.1), получим:

$$e_1 = -\frac{w\left(d\left(\Phi_{max} \sin \omega t\right)\right)}{dt} = -w_1 \Phi_{max} \omega \cos \omega t. \quad (4.4)$$

Из математики известно, что

$$\cos \omega t = -\sin(\omega t - 90°), \quad (4.5)$$

тогда

$$e_1 = w \Phi_{max} \omega \sin(\omega t - 90°). \quad (4.6)$$

То же с ЭДС e_2:

$$e_2 = w_2 \Phi_{max} \omega \sin(\omega t - 90°). \quad (4.6,a)$$

В формулах (4.6) и (4.6,*а*) максимальное значение ЭДС:

$$E_{1max} = w_1 \Phi_{max} \omega, \quad (4.7)$$

$$E_{2max} = w_2 \Phi_{max} \omega. \quad (4.8)$$

Учитывая, что $\omega = 2\pi f$, определим действующее значение ЭДС E_1 и E_2:

$$E_1 = \frac{w_1 \Phi_{max} 2\pi f}{\sqrt{2}} = 4{,}44\, w_1 \Phi_{max} f, \tag{4.9}$$

$$E_2 = \frac{w_2 \Phi_{max} 2\pi f}{\sqrt{2}} = 4{,}44\, w_2 \Phi_{max} f. \tag{4.10}$$

Отношение ЭДС высшего напряжения к ЭДС низшего напряжения называется коэффициентом трансформации k:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4{,}44\, w_1 \Phi_{max} f}{4{,}44\, w_2 \Phi_{max} f} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \tag{4.11}$$

Устройство трансформатора. Части трансформатора, предназначенные для преобразования напряжения (магнитопровод и обмотки), называют *активными частями* трансформатора.

При работе трансформатора выделяется теплота. Для охлаждения активной части применяют воздух или трансформаторное масло. В первом случае трансформатор называют «сухим», во втором — «масляным». В последнем случае активную часть помещают в бак с трансформаторным маслом, где масло одновременно выполняет роль изоляции.

К магнитопроводу трансформатора предъявляют следующие требования:

– небольшое магнитное сопротивление;
– минимальные магнитные потери;
– высокая механическая прочность.

Часть магнитопровода, на котором расположена обмотка, называется *стержнем*, соединение стержней в замкнутую магнитную цепь осуществляется *ярмом*.

Магнитопровод трансформатора изготовляют из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм (при частоте 50 Гц) и толщиной от 0,08 до 0,2 мм (при частоте 400 Гц). Листы изолируют друг от друга лаком или жаростойким покрытием в виде керамических или оксидных пленок, которые не повреждаются при заготовке пластин и их отжиге.

Однофазный стержневой трансформатор (рис. 4.2, *а*) имеет два стержня С, на которых расположены обмотки и два ярма. Одно-

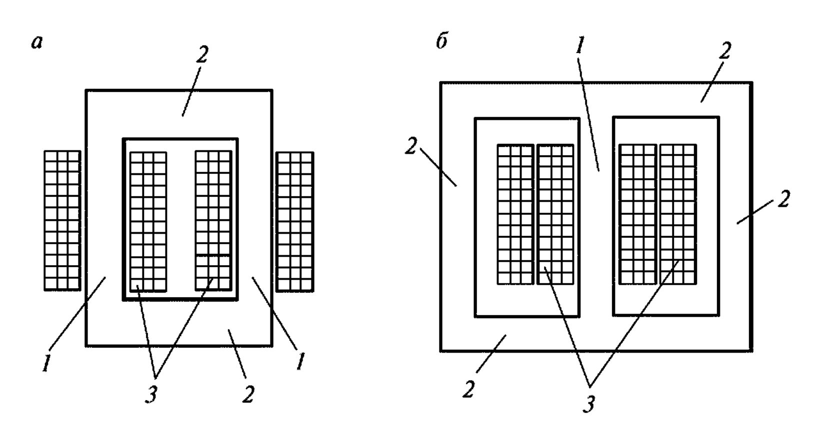


Рис. 4.2. Основные типы однофазных трансформаторов:
а — стержневой; *б* — броневой: *1* — стержень; *2* — ярмо; *3* — обмотки трансформатора

фазные стержневые трансформаторы применены в качестве тяговых на электроподвижном составе.

Однофазный броневой трансформатор (рис. 4.2, *б*) имеет один стержень С, на котором расположены обмотки и ярмо, частично охватывающее обмотки подобно броне.

Трехфазные трансформаторы (рис. 4.3, *а, г*) имеют три одинаковых стержня *1*, соединенные в замкнутую магнитную цепь ярмами *3*. Как стержни, так и ярма изготавливают из отдельных пластин электротехнической стали. На стержни надеты катушки *2*.

По конструкции сочленения стержней с ярмами трансформаторы подразделяют на стыковые (рис. 4.4, *а*) и шихтованные (рис. 4.4, *б*) магнитопроводы.

В первом случае стержни и ярмо собираются отдельно и соединяются друг с другом с помощью стяжных шпилек, а в местах стыков во избежание замыкания листов и возникновения вихревых токов ставятся изоляционные прокладки. Во втором случае стержни и ярма собираются вместе в переплет как цельная конструкция.

В настоящее время магнитопроводы трансформаторов выполняются из холоднокатаной электротехнической стали, которая обладает лучшими магнитными свойствами, чем горячекатаная. Однако в этой стали направление проката и направление силовых линий магнитной индукции должны совпадать. При их несовпадении про-

Рис. 4.3. Схемы магнитопроводов трансформаторов:
а — стержневого трехфазного; *б* — бронестержневого однофазного; *в* — бронестержневого трехфазного; *г* — общий вид стержневого трехфазного магнитопровода

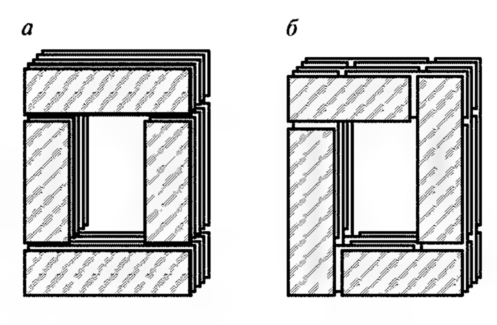


Рис. 4.4. Стыковая (*а*) и шихтованная (*б*) конструкции магнитопроводов

исходит резкое ухудшение характеристик. Если листы имеют прямоугольную форму (рис. 4.5, *а*), то в местах, где линии магнитной индукции поворачиваются на угол 90° (заштрихованный участок), наблюдается увеличение магнитных потерь и падение магнитного напряжения, что приводит в конечном итоге к ухудшению магнитных характерис-

тик трансформатора. Эти участки называют «зонами несовпадения». Для уменьшения площади «зон несовпадения» на магнитопроводах применяют косые стыки, как показано на рис. 4.5, *б*, или (в трансформаторах малой мощности) применяют ленточные разрезные магнитопроводы.

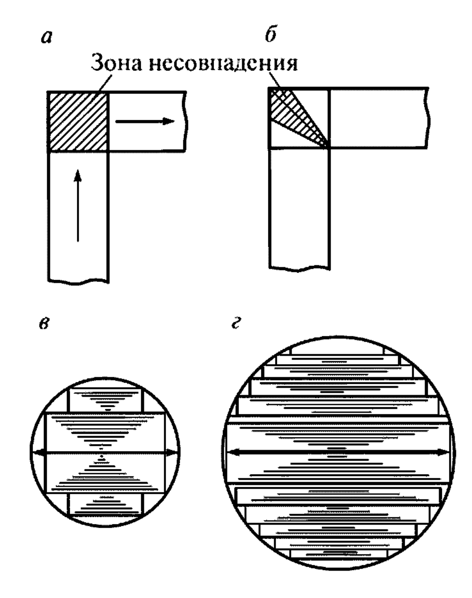


Рис. 4.5. «Зоны несовпадения» при прямом (*а*) и косом (*б*) стыках и форма сечений стержней:
в — трансформаторов малой и средней мощности; *г* — трансформаторов большой мощности

Стержни магнитопроводов трансформаторов средней и большой мощности в поперечном сечении имеют форму ступенчатой фигуры, а в трансформаторах малой мощности — форму прямоугольника. Число ступеней фигуры увеличивается с возрастанием мощности трансформатора. Увеличение числа ступеней приводит к более полному заполнению площади круга площадью ступенчатой фигуры (рис. 4.5, *в* и *г*). Такая конструкция с точки зрения расхода материалов, уменьшения габаритов и стоимости изготовления трансформатора, а также механической прочности обмоток является наиболее рациональной. В мощных трансформаторах в сечении магнитопровода предусматривают каналы для его охлаждения.

Сечение ярма берется с небольшим числом ступеней или даже прямоугольным. Это упрощает технологию его изготовления. Площади сечения ярем выбираются так, чтобы их площадь была на 10—15 % меньше, чем в стержнях. Ярма мощных трансформаторов стягивают стальными балками, в маломощных трансформаторах — деревянными.

Провод обмоток трансформатора имеет круглое или прямоугольное сечение. Материал — медь, иногда алюминий. Для их изоляции используется эмаль, кабельная бумага и хлопчатобумажная

пряжа, а в мощных трансформаторах — нагревостойкая изоляция из стекловолокна. Основой обмотки, как правило, является бакелитовый цилиндр.

На магнитопроводе обмотки располагают двумя способами: концентрическими и чередующимися. При первом способе на стержнях располагают обмотки низкого напряжения НН, которые требуют меньшей изоляции относительно остова, а снаружи — обмотку высшего напряжения ВН. Во втором случае обмотки НН и ВН, расположенные на стержне, чередуются друг с другом. Чередующиеся обмотки имеют меньшее магнитное сопротивление, но более сложны в изготовлении. Поэтому наиболее часто применяют концентрические обмотки, из которых можно выделить следующие: многослойную цилиндрическую (рис. 4.6, *а*), винтовую (рис. 4.6, *б*) и непрерывную спиральную катушечную (рис. 4.6, *в*).

Цилиндрические однослойные и многослойные обмотки изготавливают из круглого или прямоугольного проводников. Между слоями прокладывают изоляцию из кабельной бумаги.

Винтовые одно- и многослойные обмотки наматывают из ряда параллельных проводников прямоугольного сечения, уложен-

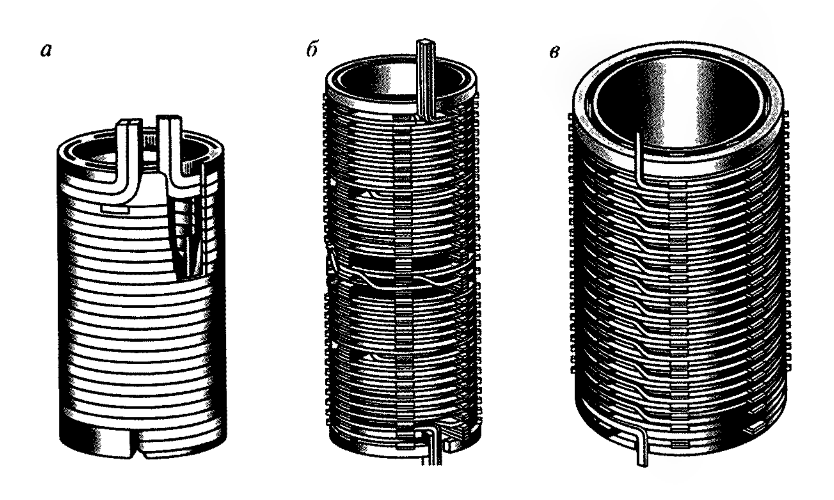


Рис. 4.6. Конструкция концентрических обмоток:
а — двухслойная цилиндрическая; *б* — винтовая; *в* — непрерывная спиральная катушечная

ных по винтовой линии и отделенных изоляционными прокладками (ряд от ряда).

Способы соединения обмоток трехфазных трансформаторов. Обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены в «звезду» или в «треугольник». Кроме того, обмотка низшего напряжения масляных трансформаторов средней мощности может иметь соединение «зигзаг», при котором каждая фаза вторичной обмотки располагается на двух различных стержнях, по половине общего количества витков на каждом стержне. При соединении в «звезду» концы обмоток образуют общую точку, а при соединении в «треугольник» начало первой части фазной обмотки соединяется с концом третьей, начало второй — с концом первой и начало третьей — с концом второй. В первом случае все начала, а во втором случае — общие точки обмоток присоединяют к сети.

Пересчет параметров трансформатора. Величины, характеризующие условия работы, на которые рассчитан трансформатор, называются *номинальными*, основные из них указываются на паспортном щитке.

Номинальной полезной мощностью трансформатора называется полная мощность трансформатора на зажимах вторичной обмотки. Для двухобмоточных силовых трансформаторов номинальная полная подведенная мощность (первичной обмотки) принимается равной номинальной полной мощности (вторичной обмотки):

$S_{1н} = U_{1н} I_{1н}$ — для однофазного трансформатора;

$S_{1н} = \sqrt{3}\, U_{1нл} I_{1нл} = 3\, U_{1нф} I_{1нф}$ — для трехфазного трансформатора.

Под *номинальным напряжением* понимаются линейные номинальные напряжения каждой из обмоток на линейных выводах $U_{1нл}$ и $U_{2нл}$.

Номинальные токи определяются по номинальной мощности и номинальному напряжению обмотки:

$I_{1н} = S/U_{1н}$ — для однофазного трансформатора;

$I_{1нл} = S/\sqrt{3}\, U_{1нл}$ — для линейного тока трехфазного трансформатора;

$I_{1нф} = S/3U_{1нф}$ — для фазного тока трехфазного трансформатора.

Приведенные на щитке трансформатора номинальные данные не следует понимать как предписание эксплуатировать трансфор-

матор только в номинальном режиме. Работа трансформатора возможна и в диапазоне тока от 0 до $I_{2н}$. Также возможны и некоторые перегрузки по току.

Приведенный трансформатор. Параметры первичной и вторичной обмоток трансформатора могут сильно отличаться. Например, на первичную обмотку тягового трансформатора подается номинальное напряжение 25 000 В, а с обмотки собственных нужд снимается 380 В. Если построить векторную диаграмму в масштабе 1 см : 1000 В, то вектора ЭДС будут иметь длину: для первичной обмотки — 250 см, а для вторичной обмотки — 0,38 см — что вызовет несомненные неудобства.

Указанные затруднения устраняются путем пересчета всех параметров трансформатора к одинаковому числу витков; наиболее часто — к числу витков первичной обмотки w_1. Все пересчитанные величины, относящиеся к пересчитанной обмотке, называются *приведенными* и обозначаются теми же символами, что и действительные величины, но со штрихом сверху: E'_2, U'_2, I'_2, r'_2 и т.д.

Таким образом, реальный трансформатор с коэффициентом трансформации $k = w_1/w_2$ заменяется на эквивалентный трансформатор с $k = w_1/w'_2 = 1$, где $w_1 = w'_2$. Полученный трансформатор называют *приведенным.* Однако результаты пересчета не должны отразиться на энергетических показателях трансформатора, т.е. мощность, магнитный поток и фазовые сдвиги во вторичной обмотке должны остаться без изменения.

Электромагнитная мощность вторичной обмотки реального трансформатора $E_2 I_2$ должна быть равна электромагнитной мощности вторичной обмотки приведенного трансформатора $E_2 I_2 = E'_2 I'_2$. Откуда $E'_2 = E_2 I_2 / I'_2 = E_2 k$; $I'_2 = I_2 / k$.

Таким же образом изменяются и другие величины, имеющие такую же размерность, как ЭДС: $E'_{2\sigma} = E'_{2\sigma} k$; $U'_2 = U_2 k$.

Приведенные сопротивления вторичной обмотки определяем из равенства потерь в проводниках действительной и приведенной вторичных обмоток, т.е. $I_2'^2 r_2' = I_2^2 r_2$, откуда $r_2' = \left(I_2 / I_2'\right)^2 r^2 = k^2 r_2$. То же относится к реактивным и полным сопротивлениям $x'_2 = x_2 k^2$; $z'_2 = z_2 k^2$.

Режимы работы трансформаторов. Работа трансформатора под нагрузкой определяется двумя предельными режимами работы: холостого хода (х.х.) и короткого замыкания (к.з.).

При *холостом* ходе трансформатора к зажимам первичной обмотки подводится номинальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута, т.е. ток вторичной обмотки равен нулю.

При режиме *короткого* замыкания трансформатора вторичная обмотка замкнута накоротко, а к первичной обмотке подводится пониженное напряжение такой величины, чтобы по обмоткам протекали номинальные токи. При этом напряжение вторичной обмотки равно нулю.

Режимы холостого хода и короткого замыкания являются, как указывалось выше, предельными режимами. Поэтому любой нагрузочный режим можно рассматривать как промежуточный между двумя предельными режимами и получить этот нагрузочный режим путем наложения одного предельного режима на другой.

Кроме того, холостой ход и короткое замыкание трансформатора позволяют определить ряд величин, имеющих важное значение для эксплуатации трансформатора. Например, при определении КПД нужно располагать потерями при холостом ходе трансформатора и при его коротком замыкании.

Процессы в трансформаторе при холостом ходе. Под действием приложенного напряжения по первичной обмотке протекает ток $I_1 = I_0$, составляющий 5—10 % от номинального значения. Этот ток можно разложить на две составляющие — активную $I_{оа}$ и реактивную $I_{0\mu}$:

$$I_0 = \sqrt{I_{оа}^2 + I_{о\mu}^2}. \qquad (4.12)$$

Активную составляющую фазного тока в трехфазных трансформаторах определяют как

$$I_{оа} = \frac{P_0}{3U_1}; \qquad (4.13)$$

в однофазных

$$I_{оа} = \frac{P_0}{U_1}. \qquad (4.14)$$

Активная мощность P расходуется на покрытие потерь в трансформаторе. Реактивная составляющая тока $I_{0\mu}$ создает основной магнитный поток и совпадает с ним по фазе.

Магнитный поток трансформатора, созданный реактивным током, имеет две составляющие — основной магнитный поток Ф, замыкающийся по магнитопроводу, и поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, магнитные силовые линии которого пронизывают только витки первичной обмотки и замыкаются по воздуху. Поток Φ_σ индуктирует в первичной обмотке ЭДС $E_{\sigma 1}$ рассеяния:

$$E_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 x_1, \tag{4.15}$$

где x_1 — индуктивное сопротивление первичной обмотки.

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для первичной обмотки трансформатора:

$$U_1 + \dot{E}_1 + \dot{E} = \dot{I}_0 r_1, \tag{4.16}$$

откуда

$$U_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_1 + j\dot{I}_1 x_1. \tag{4.17}$$

Магнитный поток рассеяния, замыкающийся по воздуху, встречает большое магнитное сопротивление, поэтому очень мал по сравнению с основным магнитным потоком. Поэтому ЭДС рассеяния $E_{\sigma 1}$ очень мала по сравнению с ЭДС $\dot{E}_1$. Следовательно, составляющими уравнения (4.17) $\dot{I}_0 r_1$ и $j\dot{I}_1 x_1$ можно пренебречь:

$$U_1 \approx -E_1,\ E_2 = U_{20},$$

тогда

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2}. \tag{4.18}$$

Таким образом, при холостом ходе можно определить коэффициент трансформации.

Потери в стали $P_{ст}$ трансформатора пропорциональны амплитудному значению B_m во второй степени:

$$P_{ст} \equiv P_0 \equiv B_m^2 \equiv \Phi_m^2 \equiv E_1^2. \tag{4.19}$$

Потери в меди обмоток пропорциональны току во второй степени:

$$P_м = I_0^2 r. \tag{4.20}$$

Так как ток холостого хода очень мал, то потерями в меди можно пренебречь. Следовательно, при опыте холостого хода определяют потери в стали.

Процессы в трансформаторе при коротком замыкании. Короткое замыкание возникает в трансформаторе обычно вследствие каких-либо неисправностей, например при повреждении изоляции, ее пробое или ошибочных действиях обслуживающего персонала. При к.з. возникают большие токи, в 10—15 раз превышающие номинальные значения и вызывающие ударные динамические нагрузки, нагрев и повреждение изоляции.

При проведении опыта короткого замыкания трансформатора подводимое напряжение обычно составляет 3—15 % от номинального значения. Схема для проведения опыта короткого замыкания показана на рис. 4.7, *а, б.* Величина напряжения короткого замыкания приводится в паспорте трансформатора. При опыте короткого замыкания обмотку низшего напряжения замыкают накоротко (рис. 4.7, *а*), а к обмотке высшего напряжения подводят пониженное напряжение такой величины, чтобы по обмоткам протекали номинальные токи. Для этой цели включен регулятор напряжения РНО, постепенно повышающий напряжение до некоторого значения $U_{к.ном}$, при котором токи к.з. в обмотках трансформатора становятся равными номинальным токам в первичной ($I_{1к} = I_{1ном}$) и вторичной ($I_{2к} = I_{2ном}$) обмотках.

У трехфазного трансформатора (рис. 4.7, *б*) определяют значения напряжения и тока к.з. как средние для трех фаз:

$$U = \frac{U_{кA} + U_{кB} + U_{кC}}{3}; \qquad (4.21)$$

$$I_{1к} = \frac{I_{кA} + I_{кB} + I_{кC}}{3}. \qquad (4.22)$$

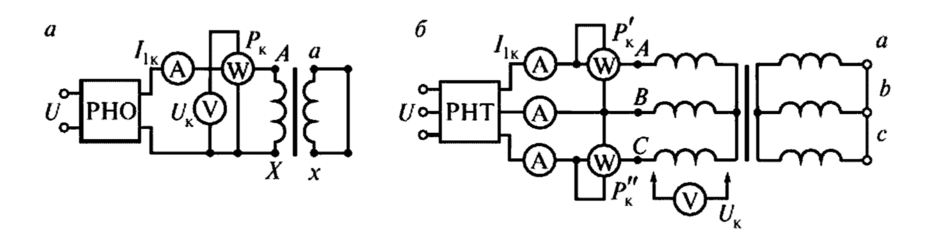


Рис. 4.7. Схемы опытов короткого замыкания на однофазном (*а*) и трехфазном (*б*) трансформаторах

Коэффициент мощности при опыте короткого замыкания:

$$\cos\varphi_к = \frac{P_к}{3U_к I_{1к}}. \quad (4.23)$$

Активную мощность трехфазного трансформатора при опыте короткого замыкания измеряют методом двух ваттметров:

$$P_к = P'_к + P''_к. \quad (4.24)$$

При понижении напряжения уменьшится и магнитный поток Ф, что вызовет уменьшение намагничивающего тока. В этом случае уравнения трансформатора имеют вид:

$$\dot{U}_{1к} - \dot{E}_{1к} = \dot{I}_{1к} Z_1; \quad (4.25)$$

$$\dot{E}_{2к} - \dot{I}_{1к} Z_1 = 0; \quad (4.26)$$

$$\dot{I}_{1к} + \dot{I}_{2к} = 0. \quad (4.27)$$

Из (4.27) следует, что при коротком замыкании токи в обмотках приведенного трансформатора равны, но противоположны по направлению $\dot{I}_{1к} = -\dot{I}_{2к}$.

Ток к.з. $\dot{I}_{1к}$:

$$\dot{I}_{1к} = \frac{\dot{U}_1}{Z_к}. \quad (4.28)$$

Напряжение к.з. измеряется в процентах от номинального:

$$u_к = \frac{U_к}{U_{ном}} \cdot 100\,\%. \quad (4.29)$$

Согласно ГОСТ 11677 напряжение к.з. составляет 5,5—10,5 %. При столь малом напряжении намагничивающий ток и магнитный поток очень малы. Поэтому очень малыми будут и потери в стали, которыми можно пренебречь. Потери в меди обмоток $P_к = P_м = I^2_{ном} r_k$, где $I_{ном}$ — номинальный ток первичной обмотки. Таким образом, при опыте короткого замыкания можно определить потери в меди обмоток.

Работа трансформатора под нагрузкой подчиняется тем же законам, что и работа в режимах холостого хода и короткого замыкания. Эти зависимости выражаются в форме уравнений ЭДС и МДС или могут быть изображены с помощью векторных диаграмм.

При нагрузке по обмоткам протекают токи: по первичной — ток I_1, а по вторичной — ток I_2. Уравнение напряжений имеет вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1. \tag{4.30}$$

При холостом ходе МДС $I_0 w_1$ создает основной магнитный поток трансформатора Φ_{max}, который индуктирует ЭДС E_1. Падение напряжения в первичной обмотке $I_1 z_1$ очень мало по сравнению с приложенным напряжением. Поэтому приложенное напряжение уравновешивается ЭДС первичной обмотки, т.е. $U_1 \approx -E_1$. Следовательно, при неизменном напряжении сети будет неизменна как ЭДС E_1, так и амплитуда магнитного потока Φ_{max} при любой нагрузке.

При холостом ходе МДС $I_0 w_1$ создает основной магнитный поток трансформатора Φ_{max}, который индуктирует ЭДС E_1 в первичной и ЭДС E_2 — во вторичной обмотках. При замыкании вторичной обмотки на сопротивление нагрузки $Z_н$ по ней будет протекать ток I_2. МДС вторичной обмотки $I_2 w_2$ будет направлена встречно магнитному потоку Φ_{max} ее создающему, стремясь уменьшить его. Но при уменьшении магнитного потока уменьшится и ЭДС E_1, что ведет к увеличению тока первичной обмотки. Ток увеличивается до такой величины, при которой МДС первичной обмотки $I_0 w_1$ компенсирует размагничивающее действие МДС $I_2 w_2$ вторичной обмотки.

Таким образом, уравнение равновесия МДС можно записать в следующем виде

$$I_0 w_1 = I_1 w_1 + I_2 w_2; \tag{4.31}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2'\right), \tag{4.32}$$

где $\dot{I}_2' = \dfrac{I_2 w_2}{w_1} = \dfrac{I_2}{k}$.

Запишем уравнение ЭДС для вторичной обмотки

$$\dot{E}_2' - \dot{E}_{\sigma 2}' = \dot{I}_2' r_2 + \dot{I}_2' z_н';$$

$$\dot{I}_2' z_н' = \dot{U}_2'; \quad \dot{E}_{\sigma 2}' = -j\dot{I}_2 x_2,$$

тогда

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' r_2' - j\dot{I}_2 x_2. \tag{4.33}$$

КПД трансформатора. Мощность P_1, подаваемая на первичную обмотку трансформатора, не равна мощности P_2, снимаемой со вторичной обмотки: часть мощности теряется в трансформаторе и в соответствии с законом сохранения энергии преобразуется в теплоту.

КПД трансформатора представляет собой отношение полезной мощности, отдаваемой трансформатором в нагрузку, к мощности, потребляемой им из сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\,\%. \tag{4.34}$$

$$P_1 - P_2 = \Delta P, \tag{4.35}$$

где ΔP — сумма потерь в трансформаторе.

Подставив (4.35) в (4.34), получим

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}. \tag{4.36}$$

Выразим изменение нагрузки трансформатора через коэффициент нагрузки $K_{нг}$:

$$K_{нг} = \frac{I_2}{I_{ном}}. \tag{4.37}$$

$$P_2 = K_{нг} P_{2ном} \cos \varphi_2, \tag{4.38}$$

где $P_{2ном}$ — номинальная мощность трансформатора;
I_2 — ток вторичной обмотки трансформатора;
$I_{ном}$ — номинальный ток трансформатора;
$\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности.

Потери мощности в трансформаторе — это потери в меди $P_м$ и потери в стали $P_{ст}$:

$$\Delta P = P_{ст} + P_м. \tag{4.39}$$

Так как при работе трансформатора частота тока сети и амплитуда магнитной индукции неизменны, то потери в стали также постоянны, они не зависят от нагрузки трансформатора и равны потерям холостого хода:

$$P_{ст} = P_0. \tag{4.40}$$

Потери в меди зависят от тока нагрузки и являются переменными потерями $P_м = K^2_{нг} P_{к\ ном}$.

Активная мощность P_2 на выходе вторичной обмотки трехфазного трансформатора:

$$P_2 = \sqrt{3}\, U_2 I_2 \cos\varphi_2 = K_{нг} S_{ном} \cos\varphi_2. \qquad (4.41)$$

Подставив значения формул (4.38), (4.40), (4.41) в формулу (4.36), получим:

$$\eta = \frac{K_{нг} S_{ном} \cos\varphi_2}{K_{нг} S_{ном} \cos\varphi_2 + P_{0ном} + K_{нг}^2 P_{к\,ном}} \cdot 100\,\%. \qquad (4.42)$$

Из анализа выражения (4.42) следует, что КПД трансформатора зависит как от величины $K_{нг}$, так и от характера ($\cos\varphi_2$) нагрузки.

Практически КПД трансформатора очень высок. Так, для трансформатора малых мощностей (до 1000 ВА) КПД составляет 85—95 %; для трансформаторов больших мощностей — 95—99,5 %.

Внешние характеристики трансформатора. Под *внешней* характеристикой трансформатора понимают зависимость напряжения на выводах вторичной обмотки U_2 от тока этой обмотки I_2 при условии, что $\cos\varphi$, первичное напряжение U_1 и частота f постоянны.

При холостом ходе, когда $I_2 = 0$, напряжение на выводах вторичной обмотки равно ЭДС этой обмотки E_{20}. Как уже было сказано, напряжение для вторичной обмотки при $U_{1ном}$ принимается за номинальное $E_{20} = U_{2ном}$.

При нагрузке трансформатора появляется ток во вторичной обмотке и увеличивается ток в первичной обмотке. Эти токи вызывают падение напряжения в обмотках, в результате чего напряжение на выводах вторичной обмотки будет изменяться. Если пренебречь намагничивающим током I_0 вследствие его относительной малости, то в режиме нагрузки при росте тока нагрузки I_2 напряжение на зажимах трансформатора будет уменьшаться, но это только при активно-индуктивной нагрузке. При росте тока при активно-емкостной нагрузке напряжение может увеличиться (рис. 4.8). Наклон кривых внешних характеристик зависит от характера нагрузки трансформатора ($\cos\varphi_2$).

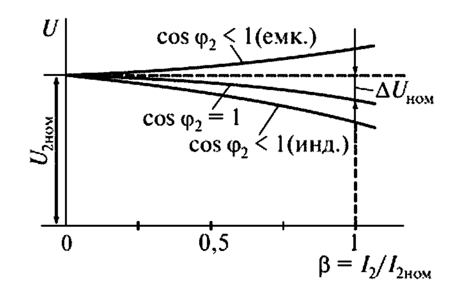


Рис. 4.8. Внешние характеристики трансформатора

Арифметическая разность вторичных напряжений при холостом ходе и токе I_2 называется *изменением напряжения трансформатора*. Его принято выражать в процентах номинального напряжения:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{2н}} \cdot 100 = \frac{U_{2н} - U_2'}{U_{2н}} \cdot 100 = \frac{U_{1н} - U_2'}{U_{1н}} \cdot 100.$$

Значение $\Delta U\%$ можно найти, изменяя непосредственно нагрузки трансформатора.

Регулирование напряжения трансформаторов. Трансформатором можно регулировать величину выходного напряжения. Для этой цели в обмотке трансформатора делают ответвления (рис. 4.9). Ответвления обмоток могут быть как на вторичной стороне, так и на первичной. У тяговых трансформаторов переключение контактов ответвлений выполняют, как правило, под нагрузкой. Последовательность переключения с контакта X_1 на контакт X_3 обмотки трансформатора показана на рис. 4.10, *б*.

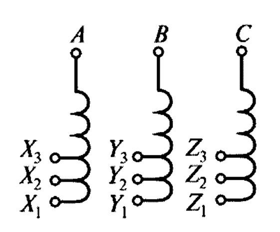


Рис. 4.9. Схемы обмоток трехфазного трансформатора с ответвлениями

В исходном положении оба подвижных контакта $П_1$ и $П_2$ находятся на одном ответвлении X_1, а контакты $К_1$ и $К_2$ замкну-

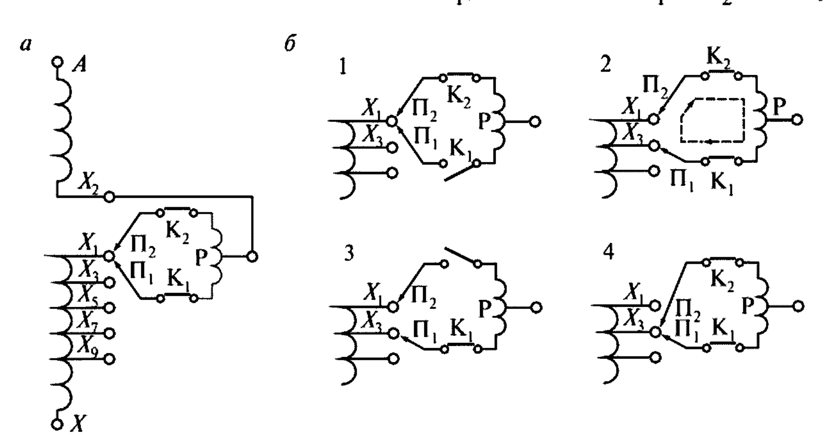


Рис. 4.10. Последовательность переключения контактов трансформатора под нагрузкой:
а — схема переключателя; *б* — процесс переключения

ты (рис. 4.10, *а*). В положении 1 размыкается контакт $К_1$ и контакт $П_1$ в обесточенном состоянии переключается на контакт ответвления X_3. После этого замыкается контакт $К_1$ (положение 2). Индуктивное сопротивление (реактор Р) ограничивает ток к.з. секции обмотки трансформатора X_1—X_3. В положении 3 размыкается контакт $К_2$ и происходит переключение контакта $П_2$ на контакт ответвления X_3. В положении 4 контакт $К_2$ замкнут и оба контакта $П_1$ и $П_2$ находятся на ответвлении X_3.

4.2. Тяговые трансформаторы

Тяговые трансформаторы предназначены для преобразования напряжения контактной сети в напряжение цепей ТЭД и собственных нужд электровоза.

На электровозах ВЛ60^к, ВЛ60^п установлены трансформаторы типа ОЦР-5600/25; ВЛ80^к — ОЦР-5000/25; ВЛ80^т, ВЛ80^с — ОДЦЭ-5000/25Б; ВЛ85, ВЛ65, ЭП1 — ОНДЦЭ-10000/25-82.

В обозначениях типов трансформаторов буква О указывает на число фаз (однофазный), Ц — на принудительную циркуляцию масла, Д — на принудительное дутье, Э — на принадлежность к электровозу, Н — на направленный поток масла, Р — на назначение трансформатора (питание ртутных выпрямителей). Числитель дроби означает типовую мощность трансформатора в кВА, знаменатель — на номинальное напряжение в кВ.

Устройство. В качестве примера рассмотрим устройство тягового трансформатора ОДЦЭ-5000/25Б (рис. 4.11).

Технические характеристики трансформатора ОДЦЭ-5000/25Б

Напряжение сетевой обмотки, В	$25\,000^{+4000}_{-6000}$
Мощность сетевой обмотки, кВА	4485
Ток тяговой обмотки, А:	
длительный	1750
часовой	1840
Напряжение холостого хода, В:	
тяговой обмотки	1218
обмотки собственных нужд	232, 406, 638
Ток обмотки собственных нужд, А	550
Мощность обмотки собственных нужд, кВА	225
Общие потери, кВт	Не более 100
КПД, %	97,6
Масса, кг	8000

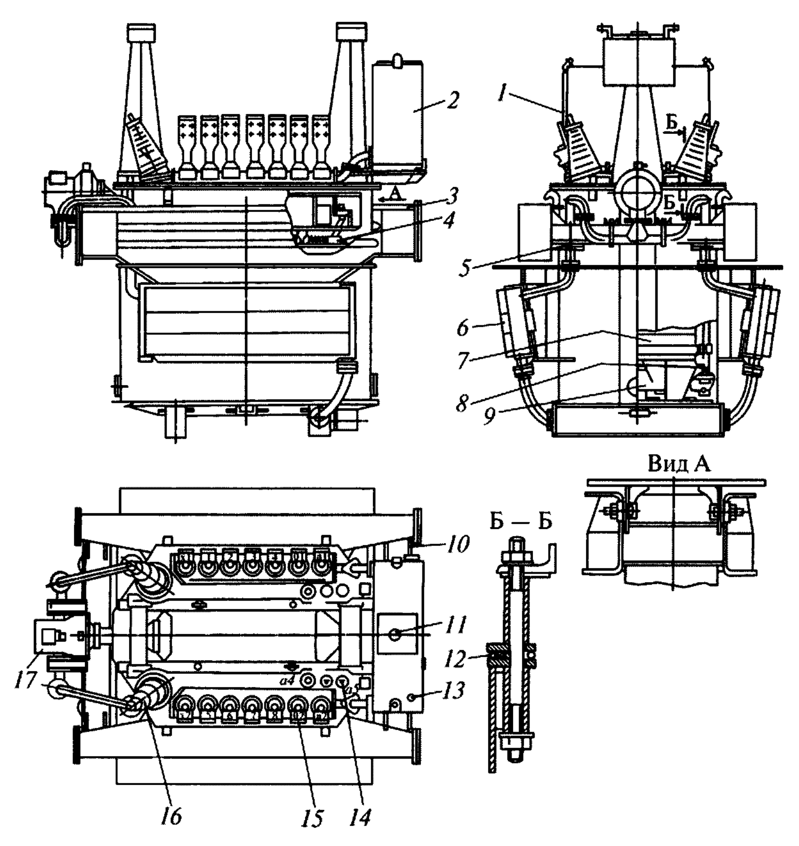


Рис. 4.11. Тяговый трансформатор ОДЦЭ-5000/25Б:
1 — маслоуказатель; *2* — расширитель; *3* — балка-камера; *4* — автоматическое прессующее устройство; *5* — опорный конический стакан; 6 — охладитель; *7* — активная часть; *8* — отводы; *9* — ярмовая балка; *10* — опорная балка; *11*, *13* — пробки; *12* — резиновое уплотнение; *14* — вводы обмотки собственных нужд; *15* — вводы тяговых обмоток; *16* — вводы сетевой обмотки; *17* — электронасос

Активная (выемная) часть *7* помещена в стальной восьмигранный бак с трансформаторным маслом, которое обеспечивает необходимую изоляцию и охлаждение обмоток. Соединение бака с крышкой — фланцевое, с резиновым уплотнением *12*. В нижней части торцевых граней бака установлены два упора для крепления активной части. Отверстия в баке в местах установки упоров закрыты съемными стальными заглушками.

Трансформатор опирается четырьмя коническими стаканами *5*, через резиновые конусы, размещенными в двух опорных балках *10* кузова.

Блок камера *3* является воздуховодом системы охлаждения в то же время увеличивает жесткость продольных граней бака.

Масло в систему охлаждения нагнетается электронасосом *17*. Охладитель *6* состоит из шести секций радиаторов, расположенных двумя группами на боковых гранях бака. Каждая секция в свою очередь состоит из комплекта ребристых медных труб.

Электронасос нагнетает горячее масло из верхней части бака через охладитель и через нижнюю ярмовую балку *9* в бак трансформатора. Температура масла в эксплуатации не должна превышать 85 °С, кратковременно 95 °С.

По маслоуказателю *1*, расположенному на расширителе *2*, контролируют уровень масла. Пробка *11* имеет атмосферное отверстие, благодаря которому может меняться объем масла в баке при изменении его температуры. Для доливки масла в расширитель предназначено отверстие, закрытое пробкой *13*.

На крышке бака трансформатора расположены: два ввода *16* первичной обмотки на ток 275 А; четырнадцать вводов *15* тяговых обмоток на 2000 А; четыре ввода *14* обмотки собственных нужд на ток 1000 А.

Вводы соединены с ответвлениями *8* обмоток демпферами из гибких медных проводников. Все вводы разборные и допускают замену изоляторов без подъема активной части.

Активная часть трансформатора ОНДЦЭ-10000/25-82 состоит из двухстержневого магнитопровода и концентрических обмоток, выполненных из медных проводов с бумажной изоляцией (рис. 4.12).

Обмотки каждого стержня закреплены на трех изоляционных цилиндрах с помощью картонных прокладок и реек. Сначала у сердечника расположены нерегулируемые части тяговых спиральных обмоток (вводы a1—x1 на одном стержне и a2—x2 — на другом). В середине размещена сетевая первичная обмотка (вводы А—Х). Сетевые обмотки обоих сердечников соединены параллельно. На наружном цилиндре расположены дисковые катушки регулируемой части тяговой обмотки и обмотки собственных нужд. Сопротивления изоляции обмоток приведены в табл. 4.1.

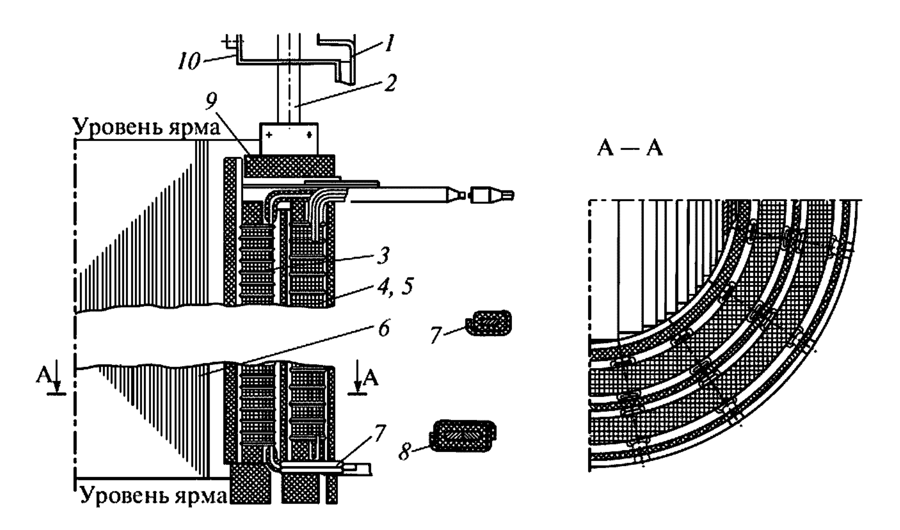


Рис. 4.12. Активная часть трансформатора ОНДЦЭ-10000/25-82:
1 — отводы; *2* — прижим; *3* — сетевая обмотка; *4*, *5* — блоки обмоток стержня А; *6* — остов трансформатора; *7*, *8* — коробки; *9* — прессующее кольцо; *10* — верхняя ярмовая балка

Таблица 4.1

Сопротивлеиия изоляции обмоток тягового траисформатора ОДЦЭ-5000/25Б

Вводы	Сопротивление, МОм	Вводы	Сопротивление, МОм
А—корпус	1300	а2—корпус	1300
А—а1	1300	а2—01	1300
А—а2	1300	а2—02	1300
А—01	1300	а2—а3	1500
А—02	1300	а3—корпус	1300
А—а3	1500	а3—01	800
а1—корпус	1300	а3—02	800
а1—а2	1500	01—корпус	500
а1—01	1300	01—02	300
а1—02	1300	02—корпус	500
а1—а3	1500		

Вводы представляют собой проходные изоляторы и предназначены для соединения обмоток трансформатора с внешней сетью. На масляных трансформаторах вводы устанавливают на крышке или

на стенке бака. Для тяговой обмотки, обмоток собственных нужд применяют составные вводы (рис. 4.13), изоляторы которых состоят из двух частей — верхней, наружной (собственно изолятора) и нижней, внутренней втулки, изготовленной из фарфора или высокопрочной пластмассы АГ-4С. Чтобы заменить наружный изолятор у таких вводов, не требуется вынимать активную часть трансформатора. Вводы сетевой обмотки — несъемные. Для смены изоляторов требуется поднять активную часть трансформатора.

Ввод обмотки на 25 кВ (рис. 4.14) состоит из фарфорового изолятора *4* и медного стержня *5*. Один конец фарфорового изолятора заходит внутрь бака, а другой — выступает над крышкой. Сечение токоведущего стержня определяется величиной тока, проходящего через вводы.

На трансформаторе ОДЦЭ5000/25Б все вводы выведены на крышку бака. Вводы подключены через переходной реактор к

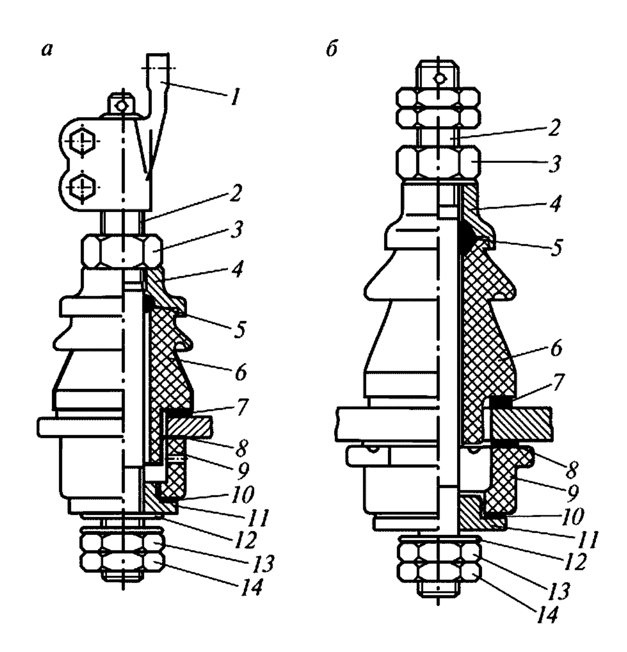


Рис. 4.13. Составной ввод на напряжение 1 кВ и токи 1000 А (*а*) 600 и 250 А (*б*): *1* — литой наконечник; *2* — токоведущий стержень; *3* — гайка; *4* — колпак; *5*, *7*, *8*, *10* — резиновая прокладка; *6* — изолятор; *9* — фарфоровая втулка; *11* — втулка; *12* — шайба; *13*, *14* — гайки

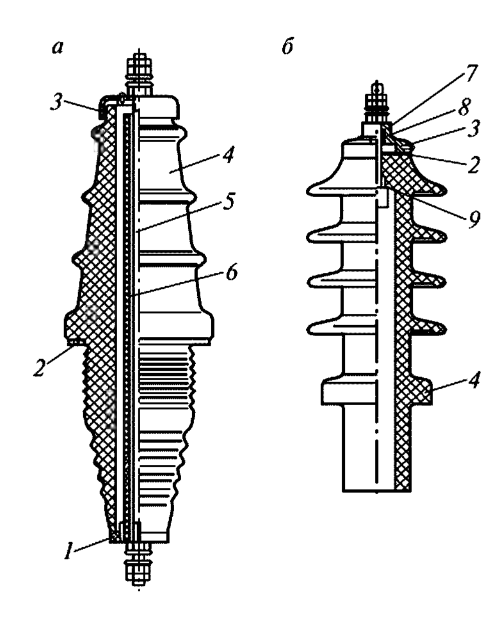


Рис.4.14. Ввод сетевой обмотки 25 кВ несъемный (*а*) и съемный (*б*):

1 — гетинаксовая шайба; *2, 9* — резиновая прокладка; *3* — стальной колпак; *4* — фарфоровый изолятор; *5* — медный стержень; *6* — бакелитовая трубка; *7* — стальная втулка; *8* — уплотнительное кольцо

групповому переключателю ЭКГ-8Ж, который выполняет согласное или встречное соединение регулируемых и нерегулируемых обмоток, а также посекционное включение регулируемых частей.

Автоматическое прессующее устройство обмотки. При работе трансформатора изоляция катушек дает усадку, что может вызвать перемещение катушки от действия вибраций и динамических усилий, вызывающее повреждение изоляции и выход трансформатора из строя.

Тяговый трансформатор электропоездов переменного тока содержит специальные прессующие шпильки, ввинченные в балку ярма. Один конец шпильки заканчивается квадратом под гаечный ключ, а второй — цилиндрической пластиной, которая упирается в металлическое кольцо, надетое поверх обмоток. По мере усыхания изоляции обмоток шпильки при плановых ремонтах подтягивают, воздействуя через металлическое кольцо на обмотки трансформатора.

В тяговых трансформаторах грузовых электровозов установлены автоматические прессующие устройства обмоток (рис. 4.15). На ярмовой балке расположены два специальных винта *5*. Между винтом и башмаком *4* имеется наклонный стержень *3*. Башмаки насажены на шпильку, которая одним концом упирается в винт, а другим — в башмак *4*. В то же время на башмак воздействует пружина *6*, с одного конца ограниченная упором *7*. По мере усадки изоляции обмоток под действием пружины *6* стержень будет стремиться принять вертикальное положение, воздействуя на баш-

мак *4*, который будет скользить по металлическому кольцу *1* и, нажимая на него, прессовать обмотки трансформатора. Пружина *6* постоянно находится в сжатом состоянии. Сжатое положение первоначально создают гайкой *2* с шайбой. После сжатия пружины *6* и установки стержня *3* в наклонное положение, стяжные гайки и шайбы удаляют.

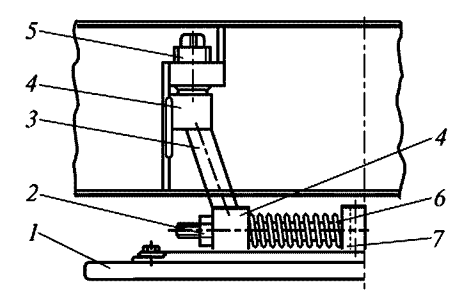


Рис. 4.15. Автоматическое прессующее устройство:
1 — прессующее кольцо; *2* — гайка; *3* — штанга; *4* — башмак; *5* — винт; *6* — пружина; *7* — упор

На рис. 4.16 показаны принципиальные схемы обмоток тяговых трансформаторов. На электровозах переменного тока обмотка ВН получает питание от контактной сети с номинальным напряжением 25 кВ. Например, на электровозах ВЛ80^{с,т}, вторичных обмоток пять: две тяговые нерегулируемые, две тяговые регулируемые и одна обмотка собственных нужд. Все обмотки расположены на двух стержнях. Стержни магнитопровода, как указывалось выше, имеют ступенчатую форму.

Трансформаторы LTS 7,85/25 и SL68/3848/51. В качестве примера трансформатора с высоковольтным регулированием рассмотрим тяговый трансформатор электровозов ЧС4^{К} и ЧС4^{ТК}, имеющие типовое обозначение соответственно LTS 7,85/25 и SL 68/3848/51.

Таблица 4.2

Основные технические характеристики трансформаторов

Параметр	LTS 7,85/25	SL 68/3848/51
Номинальная мощность, кВА	7850	8058
Номинальное входное напряжение, кВ	25	25
Частота, Гц	50	50
Потери холостого хода, кВА	10	10
Масса, кг	11 600	11 400

На электровозе ЧС4^{К} и ЧС4^{ТК} регулирование напряжения осуществляется, как указывалось выше, на первичной стороне трансформатора. Фактически тяговый трансформатор состоит из двух трансформаторов, расположенных в одном баке. Один из них пред-

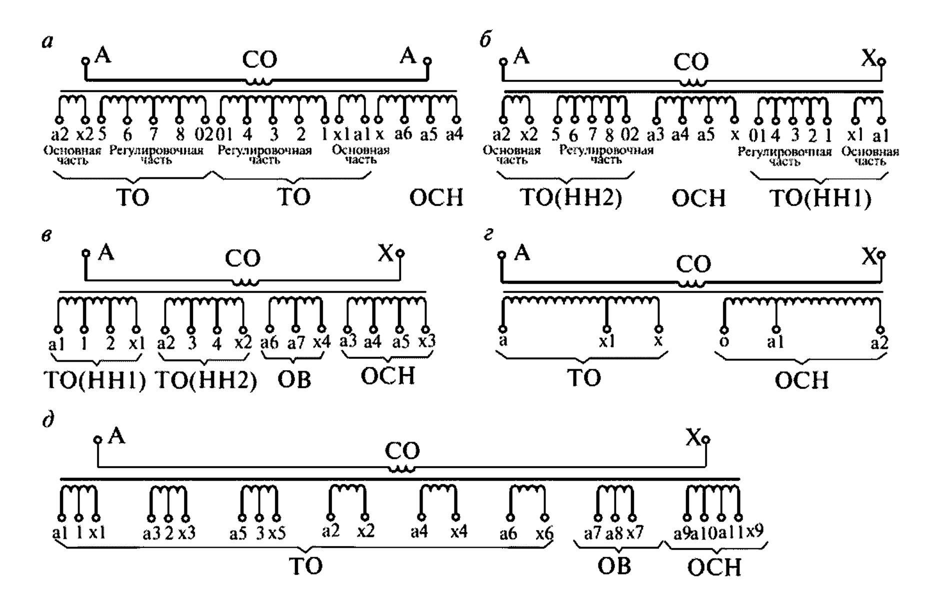


Рис. 4.16. Принципиальные схемы обмоток тяговых трансформаторов ОЦР-5000/25 (*а*), ОДЦЭ-5000/25Б (*б*), ОДЦЭ-5000/25АМ (*в*), ОДЦЭ-4000/25АМ (*г*) и ОНДЦЭ-10000/25-82 (д); ТО (НН1 и НН2) — тяговые обмотки; СО — сетевая обмотка; ОСН — обмотка собственных нужд; ОВ — обмотка возбуждения

ставляет собой автотрансформатор, а другой — обычный понижающий трансформатор с постоянным коэффициентом трансформации. Обмотка автотрансформатора является регулировочной, а понижающий трансформатор предназначен для понижения регулируемого напряжения до значения, соответствующего коэффициенту трансформации.

В тяговом трансформаторе LTS 7,85/25 (рис. 4.17) активная часть помещена в бак *4*, который в верхней части закрыт крышкой *10* с резиновым уплотнением. Бак опирается на раму кузова плитой *5* с ребрами. На крышке бака трансформатора установлены высоковольтные проходные изоляторы *2*, шинные вводы *6* вторичных обмоток, расширитель *8* с воздухоосушителем *1*, газовое реле *3*; на боковой стенке — проходные изоляторы обмоток собственных нужд *7* и отопления поезда *9*, а также переключатель ступеней *11*. Все уплотнения бака выполнены из маслостойкой и морозостойкой резины.

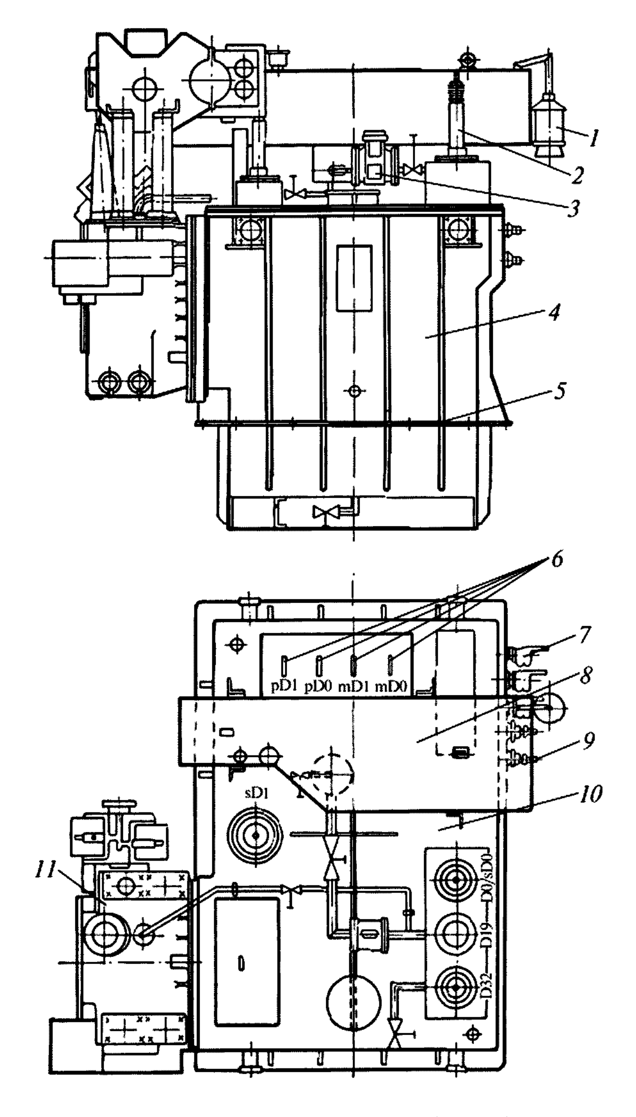


Рис. 4.17. Трансформатор LTS 7,85/25-1:
1 — воздухоосушитель; *2, 7, 9* — проходные изоляторы; *3* — реле газовой защиты; *4* — бак; *5* — плита; *6* — шинные вводы; *8* — расширительный бак; *10* — крышка; *11* — переключатель ступеней

На стенке расширителя имеется дистанционный контактный термометр, контролирующий температуру верхних слоев масла в баке тягового трансформатора. При повышении температуры масла выше допустимой величины термометр включает сигнальную лампу «Перегрев трансформаторного масла» на пульте управления электровозом. Контакты термометра устанавливают на +60 °С — нормальная температура — и на +90 °С — максимальная температура. Расширитель снабжен предохранительным клапаном, пробкой для спуска масла и воздухоосушителем.

Магнитопровод тягового трансформатора броневого типа (рис. 4.18) состоит из трех стержней *4* и ярма *1*. Шпильками *3* стянуты листы в стержнях. Стержни замкнуты ярмовыми балками *2*, благодаря чему образуется замкнутая магнитная цепь. Шпильками *5* опрессован магнитопровод. Выемка магнитопровода производится рым-болтами с проушинами и четырьмя распорками.

Схема соединения обмоток тягового трансформатора приведена на рис. 4.19. Автотрансформатор имеет первичную обмотку D32—D0 и вторичную, у которой один ввод 0 совмещен с выводом первичной обмотки, а второй является скользящим (контакт K) и может занимать любое положение от 1 до 32. У понижающего трансформатора имеются обмотки: первичная sD0 и mD1, две вторичные с вводами mD0 и mD1, вспомогательная обмотка d0—d2 напряжением 260 В с отпайкой d1 на напряжение 213 В и обмотка отопления поезда uD1—uD0 напряжением 3030 В. Электрическое соеди-

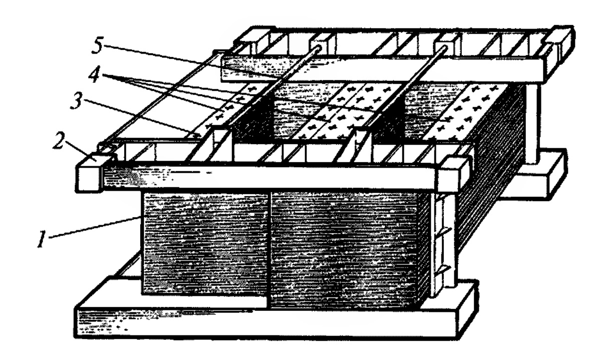


Рис. 4.18. Магнитопровод трансформатора LTS 7,85/25:
1 — ярмо; *2* — ярмовая балка; *3* — шпильки; *4* — стержни; *5* — стяжные шпильки

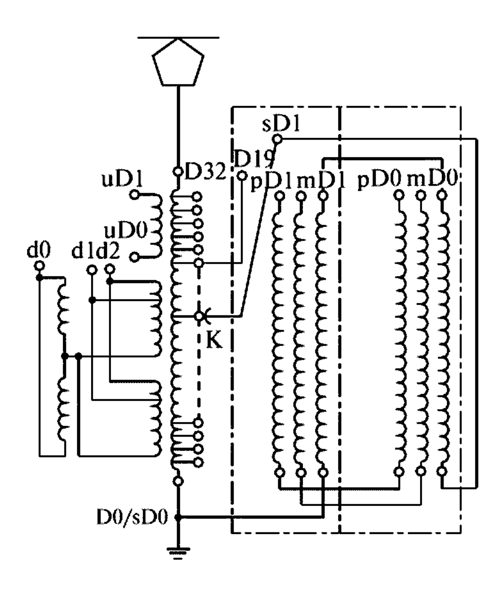


Рис. 4.19. Схема соединения обмоток тягового трансформатора LTS7,85/25

нение ввода *sD*1 с одним из выводов автотрансформатора осуществляется аппаратом, называемым переключателем ступеней. Он условно обозначается скользящим контактом К.

4.3. Специальные трансформаторы, реакторы, индуктивные шунты

Реакторы. Реактором называют электрическую катушку, обладающую значительным индуктивным сопротивлением. Обычно индуктивное сопротивление реактора значительно превышает индуктивное сопротивление остальной электрической цепи.

Реакторы применяют: для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в цепи тяговых электродвигателей пульсирующего тока (сглаживающие реакторы); для ограничения тока в секциях тягового трансформатора при переключении позиций главного контроллера (переходные реакторы); для защиты тяговых электродвигателей от нестационарных режимов (индуктивные шунты); для стабилизации напряжения (трансформаторы ТРПШ и др.); для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в цепи аккумуляторных батарей в цепи защиты от замыкания на «землю» и др.

Сглаживающие реакторы предназначены для уменьшения пульсаций выпрямленного тока. Уровень пульсации выпрямленного напряжения оценивается коэффициентом относительной пульсации

$$K_{пu} = \frac{\Delta U_m}{U_d}, \tag{4.43}$$

где ΔU_m — амплитудное значение переменной составляющей напряжения, В;
U_d — среднее значение выпрямленного напряжения, В.

Пульсации выпрямленного напряжения вызывают пульсации тока ТЭД, которые тем больше, чем меньше индуктивность в цепи. Пульсация тока ухудшает коммутацию, увеличивает потери. Коэффициент относительной пульсации тока

$$K_{пI} = \frac{\Delta I}{I}, \tag{4.44}$$

где ΔI — величина полной пульсации тока, А;
I — среднее значение тока, А.

Индуктивность реактора

$$L = w(d\Phi/dI), \text{ Гн},$$

где w — число витков реактора,
Φ — его магнитный поток.

Коэффициент пульсации зависит от величины тока: чем больше ток, тем меньше пульсация, и наоборот. Для условий нормальной работы ТЭД необходимо, чтобы величина пульсаций в любом режиме оставалась постоянной. Для этого в цепь якоря включают реакторы, индуктивность которых наибольшая при малых токах и наименьшая — при больших. Это объясняется тем, что в катушках с ферромагнитным сердечником индуктивность изменяется прямо пропорционально магнитной проницаемости, которая зависит от магнитной индукции. Если в обмотке реактора ток возрастает, то одновременно возрастает и магнитная индукция, что вызывает уменьшение магнитной проницаемости, а следовательно, и уменьшение индуктивности. При уменьшении тока в обмотке реактора индуктивность последнего будет увеличиваться. Это свойство реактора с ферромагнитным сердечником используется в силовых цепях электровозов переменного тока для сглаживания пульсаций выпрямленного тока.

На электровозах ВЛ60^{к} устанавливают два сглаживающих реактора РЭД-4000А; ВЛ80^{к} — четыре реактора РС-32; ВЛ80^{т}, ВЛ80^{р}, ВЛ80^{с} — также четыре реактора РС-53; ВЛ85 — шесть сглаживающих реактора РС-78.

В качестве примера рассмотрим устройство сглаживающего реактора РС-53. Сглаживающий реактор (рис. 4.20) состоит из шихтованного круглого магнитопровода и катушки. Магнитопровод набран из пакетов, состоящих из отдельных листов электротехнической стали, стянутых и изолированных снаружи стеклопластиком толщиной 7 мм.

Катушка намотана из медной шины (сечением 4×65 мм) на узкое ребро и имеет 70 витков. Между витками катушки закладывается лента из электронита, сложенная вдвое с разрезами. Обмотка и сердечник с боков зажаты гетинаксовыми боковинами, а в осевом направлении стянуты изолированными шпильками из немагнитного материала (дюралюминиевого сплава).

Переходные реакторы (рис. 4.21) предназначены для ограничения тока в секциях тягового трансформатора электровоза при регулировании напряжения. В каждой секции электровоза ВЛ80 смонтированы два переходных реактора, выполненные в одном комплекте без стального сердечника.

Каждая катушка реактора намотана в виде спирали в один слой из двух параллельных шин сечением 8×60 мм с зазором между шинами 7 мм и имеет 6,75 витков. В каждом реакторе четыре катуш-

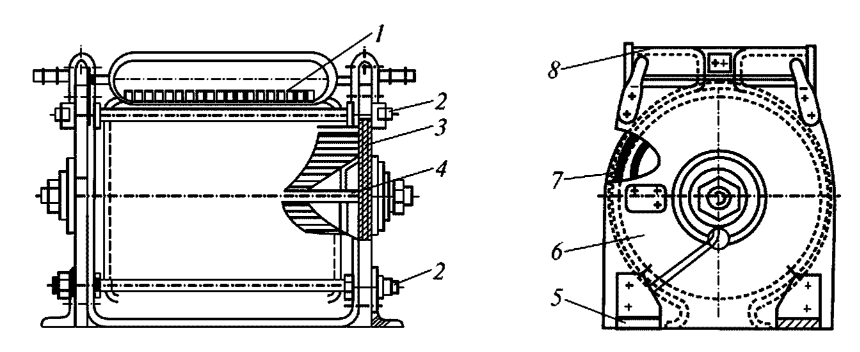


Рис. 4.20. Сглаживающий реактор:
1 — катушка; *2, 4* — стяжная шпилька; *3* — магнитопровод; *5* — установочные угольники; *6* — гетинаксовая боковина; *7, 8* — стеклопластиковые кожухи

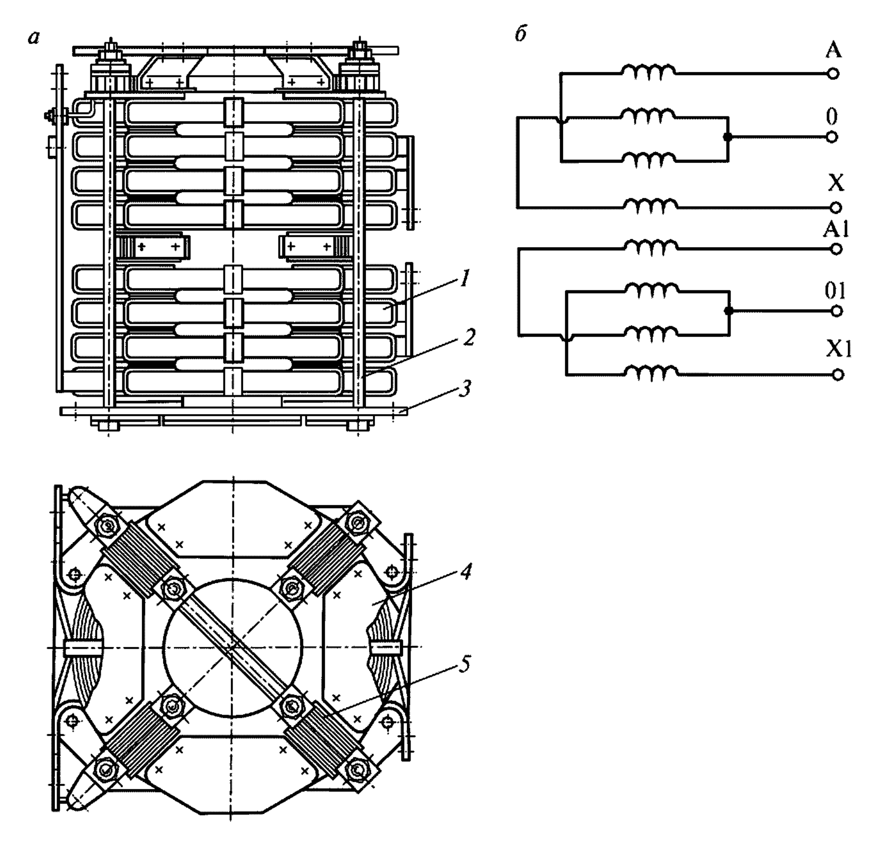


Рис. 4.21. Переходной реактор: *а* — конструкция и *б* — схема обмоток: *1* — спиральные катушки; *2* — стяжные дюралюминиевые шпильки; *3* — основание из гетинакса; *4* — защитные асбоцементные листы; *5* — экранирующие пакеты из листов электротехнической стали

ки. Причем каждая катушка в радиальном направлении скреплена восемью бандажами из стеклоленты, в осевом направлении — шпильками из дюралюминия. Концевые вводы алюминиевых шин подвергают специальному лужению с целью предохранения их от разрушения при работе в электрическом контакте с медью.

Переходные реакторы не имеют сердечников. Сверху и снизу реактора устанавливают экраны, предназначенные для защиты металлических конструкций, расположенных вблизи реактора, от нагрева вихревыми токами.

Индуктивные шунты предназначены для защиты тяговых электродвигателей электровоза от нестационарных режимов при ослаблении возбуждения.

На рис. 4.22 показана цепь ТЭД в режиме ослабления возбуждения с включенным в эту цепь индуктивным шунтом ИШ. Рассмотрим работу индуктивного шунта.

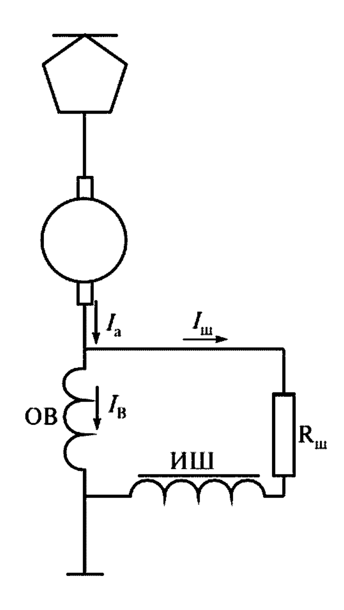
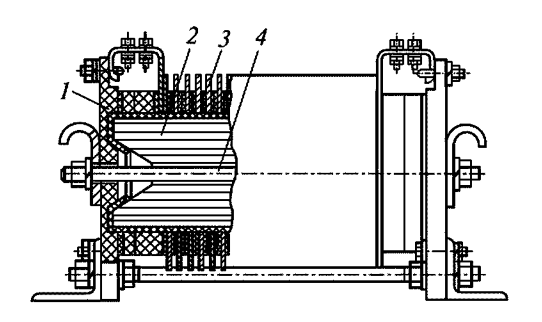


Рис. 4.22. Схема включения индуктивного шунта (ИШ)

Предположим, что при движении электровоза или электропоезда произошел кратковременный отрыв токоприемника от контактного провода. В этом случае ток, протекающий по ТЭД, уменьшится до нуля. Магнитный поток главных полюсов уменьшится до остаточного. Противо-ЭДС снизится до величины, определяемой остаточным магнетизмом ТЭД.

Когда токоприемник вновь коснется контактного провода, то ток в виде волны с крутым фронтом потечет по ТЭД. Если при этом осуществлялось движение в режиме ослабления возбуждения, то ток будет разветвляться по двум параллельным ветвям: обмотке возбуждения и сопротивлению $R_ш$, шунтирующему цепь возбуждения. Так как обмотка возбуждения обладает значительной индуктивностью $L_в$, что равносильно разомкнутой цепи для тока с крутым фронтом волны, то весь ток потечет по шунтирующей цепи, минуя обмотку возбуждения. Это приведет к тому, что ток якоря, не ограниченный противо-ЭДС, многократно превысит номинальное значение, что очень опасно для изоляции обмоток, а также вызовет быстрое насыщение добавочных полюсов. При этом добавочные полюсы будут недостаточно компенсировать реактивную ЭДС в коммутируемых секциях якоря, что приведет к сильному искрению под щетками и даже к круговому огню по коллектору.

Для защиты ТЭД от аварийного режима в шунтирующую цепь включают индуктивность $L_ш$, чтобы возникающая в ней ЭДС самоиндукции препятствовала значительному нарастанию тока и обеспечила такое распределение токов между обмоткой возбуждения и шунтирующей ее цепью, при котором коэффициент ослабления



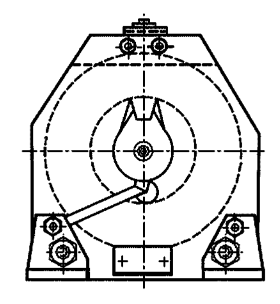


Рис. 4.23. Конструкция индуктивного шунта:
1 — боковина; *2* — магнитопровод; *3* — обмотка; *4* — шпилька

возбуждения соответствовал бы расчетному для данного типа двигателей. Обычно $L_ш > 0{,}61\ L_в$.

Индуктивный шунт ИШ-95 электровозов ВЛ80^{т,с} состоит из обмотки *3* (рис. 4.23), двух боковин *1* из гетинакса толщиной 30 мм, стянутых в осевом направлении тремя шпильками *4*. Катушка шунта собрана на магнитопроводе *2*, набранном из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм изолированых лаком. Магнитопровод изолирован стеклопластом. Обмотка катушки намотана медной лентой 3×45 мм на ребро с зазором между витками 2 мм. Катушка с магнитопроводом пропитывается в лаке вакуумно-нагревательным способом с последующей выпечкой.

На электровозах ВЛ80^с, выпускаемых после 1989 г. с ТЭД НБ-514, установлены индуктивные шунты ИШ-009 с обмоточным проводом 3×35 мм и с лучшими массогабаритными характеристиками.

Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием шунтов (ТРПШ), предназначены для питания цепей управления, освещения, сигнализации и заряда аккумуляторных батарей при поднятом токоприемнике и включенном главном выключателе (ГВ).

Технические характеристики ТРПШ

Полная мощность, кВА	9,2
Напряжение вторичной обмотки, В	280—460
Ток первичной обмотки, А	20
Напряжение вторичной обмотки, В	55
Ток вторичной обмотки, А	80
Напряжение на обмотке управления, В	60
Ток управления, А	6,5
Масса, кг	195

Как известно, напряжение в контактной сети может изменяться в довольно широких пределах. Если применить обычный трансформатор для питания через выпрямитель цепи управления и подзарядки аккумуляторных батарей, то надежной работы электровоза достичь было бы невозможно. При понижении напряжения аппараты цепей управления самопроизвольно отключились бы, а при повышении — выходили бы из строя. Срок службы аккумуляторной батареи сократился бы с 8—10 лет до нескольких недель.

Функцию стабилизации вторичного напряжения выполняет трансформатор ТРПШ (рис. 4.24). Он состоит из трех магнитопроводов: основного *1* и двух крайних (магнитные шунты) *2*. Все они набраны из листов электротехнической стали марки 3413 толщиной 0,35 мм. Два крайних магнитопровода имеют размеры в поперечном сечении 3,9×9,5 см, средний (основной) — 9,5×9,5 см. Магнитопроводы отделены друг от друга стальными трубками и стянуты изолированными шпильками.

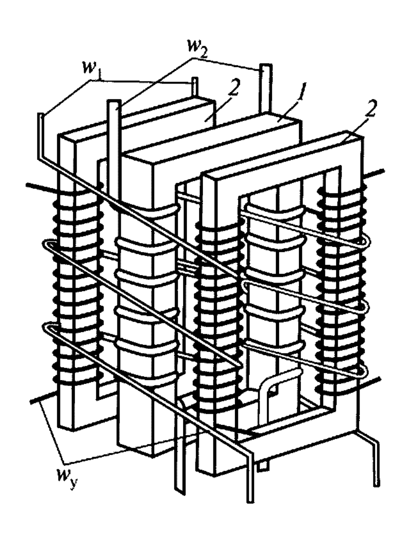


Рис. 4.24. Трансформатор ТРПШ:
1 — основной магнитопровод; *2* — магнитные шунты

Первичная обмотка w_1 состоит из двух катушек, соединенных последовательно. Обе катушки охватывают все три стержня магнитопровода. Вторичная обмотка w_2 состоит из двух параллельно включенных катушек, намотанных только на средний магнитопровод *1*. На магнитных шунтах *2* (крайних стержнях магнитопровода) намотана обмотка управления w_y, состоящая из четырех катушек, соединенных последовательно. Первичная обмотка подключена на напряжение 380 В. Обмотка управления подключена к бесконтактному регулятору напряжения (БРН) — источнику постоянного тока. При снижении напряжения в контактной сети уменьшается напряжение в обмотке w_1, а в обмотке управления w_y под действием БРН увеличивается постоянный ток. Это ведет к увеличению насыщения магнитных шунтов *2* постоянным магнитным потоком и

вытеснению в основной магнитопровод *1* переменного магнитного потока, увеличивающего напряжение во вторичной обмотке w_2.

С увеличением напряжения в контактной сети повышается напряжение в первичной обмотке w_1, а ток в обмотке управления $w_у$ под действием БРН уменьшается. Это вызывает снижение постоянного магнитного потока в магнитных шунтах *2*, замещение его переменным магнитным потоком. Вследствие этого в среднем магнитопроводе переменный магнитный поток уменьшается, что вызывает уменьшение ЭДС во вторичной обмотке.

Трансформаторы постоянного тока. Известно, что в цепях постоянного тока невозможно использовать трансформаторы, однако для косвенных измерений постоянного тока применяют специальные устройства, которые выполняют такую же роль, как и трансформаторы тока. Поэтому их условно называют трансформаторами постоянного тока (ТПТ). Их назначение — получить в измерительной цепи ток, пропорциональный току в силовой цепи, и изолировать измерительную цепь от силовой.

Латунный стержень ТПТ (рис. 4.25), представляющий собой как бы его первичную обмотку, пропущен через два тороидальных сердечника А1 и А2. Вторичные обмотки *2* тороидов, включенные встречно по отношению друг к другу, получают питание от неизменного по величине напряжения трансформатора Тр через резистор R. Величина тока i_m в их цепи зависит от сопротивления *R* и индуктивного сопротивления обмоток тороидов. Если силовой ток

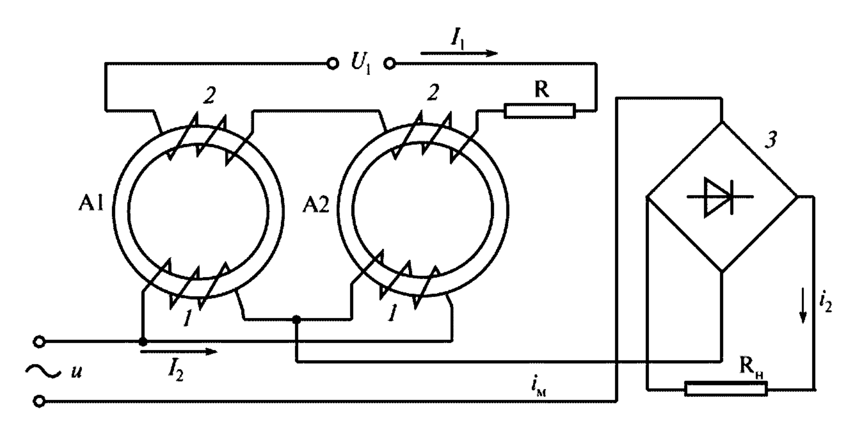


Рис. 4.25. Трансформатор постоянного тока

I_1 увеличивается, то происходит намагничивание и насыщение тороидальных сердечников, в результате чего их индуктивное сопротивление уменьшается, а ток i_m увеличивается. Таким образом, с увеличением постоянного тока I_1 увеличивается переменный ток i_m. Для того чтобы получить в измерительной цепи постоянный ток, к резистору R (напряжение на нем пропорционально току i_m) подсоединяют выпрямительный мост, на выходе которого получают выпрямленный ток i_2, также пропорциональный измеряемому току I_1.

Если силовой ток уменьшается, то вследствие увеличения индуктивного сопротивления вторичных обмоток тороидов уменьшаются токи i_m и i_2.

Таким образом, действие ТПТ основано на изменении индуктивного сопротивления обмоток тороидов при их насыщении под действием измеряемого силового тока. Обычно в ТПТ используют два тороида (а не один), причем их магнитные потоки направлены в разные стороны. Это делают для того, чтобы по возможности исключить влияние магнитных потоков рассеяния, которые могли бы нарушить пропорциональность первичного и вторичного токов.

Технические характеристики ТПТ электровозов переменного тока

Номинальный постоянный ток, А	900
Напряжение, на которое рассчитана изоляция первичной обмотки, В	1500
Номинальное напряжение вторичных обмоток, В	127
Частота, Гц	50
Сопротивление нагрузки, Ом, не более	30
Коэффициент трансформации в диапазоне от 0 до 1300 А	1250
Масса, кг	6,5

Трансформаторы постоянного напряжения по принципу действия такие же, как и ТПТ. Они предназначены для измерения напряжения в измерительной цепи и состоят из двух тороидальных сердечников A1 и A2, выполненных из железо-никелевого сплава — пермаллоя, на каждом из которых намотана рабочая обмотка *2* (рис. 4.26). Рабочие обмотки намотаны между собой встречно. Управляющая обмотка *1* охватывает оба сердечника. Поэтому ток подмагничивания трансформатора пропорционален измеряемому напряжению. Таким образом, с увеличением напряжения пропорционально возрастает ток трансформатора выходного напряжения.

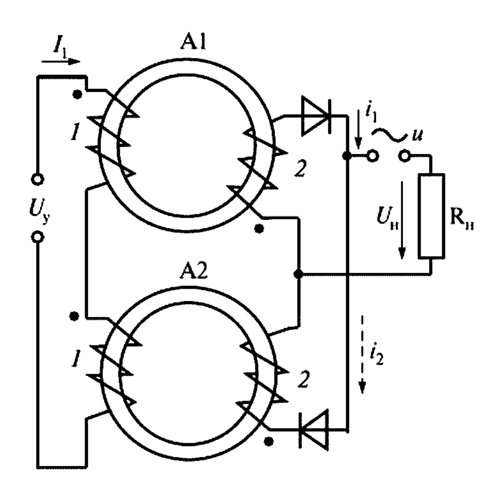


Рис. 4.26. Трансформатор постоянного напряжения

Специальные типы трансформаторов. К специальным типам трансформаторов относятся автотрансформаторы, импульсные многообмоточные трансформаторы, трансформаторы постоянного тока, постоянного напряжения, для выпрямительных устройств и др.

Автотрансформатор — вид трансформатора, в котором помимо магнитной связи между обмотками имеется еще и электрическая связь. Так же как и обычные трансформаторы, автотрансформаторы могут быть понижающими или повышающими (рис. 4.27).

К преимуществам автотрансформаторов по сравнению с двухобмоточными относится более высокий КПД и меньшая стоимость, а к недостаткам — возможность попадания высокого напряжения в сеть низкого напряжения вследствие непосредственного электрического соединения первичной и вторичной обмоток; более тяжелые условия короткого замыкания.

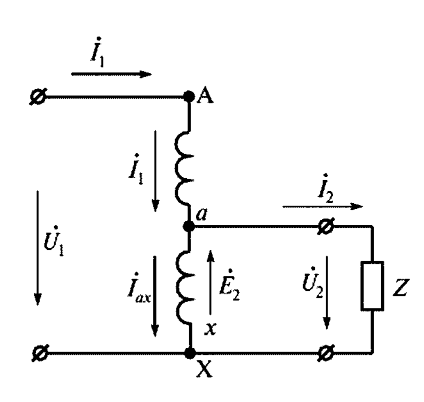


Рис. 4.27. Схема включения автотрансформатора

Импульсные трансформаторы применяются в устройствах импульсной техники для изменения амплитуды импульсов, исключения постоянной составляющей, размножения импульсов и т.п. Мощность импульсов, передаваемая современными трансформаторами, достигает нескольких ватт, их длительность колеблется от нескольких долей микросекунды до нескольких сотен микросекунд.

Основным требованием, предъявляемым к импульсным транс-

форматорам, является минимальное искажение формы передаваемого сигнала, которое происходит из-за влияния индуктивностей рассеяния, емкостных связей между обмотками и витками и обмоток и вихревых токов, индуктируемых в магнитопроводе.

Для изготовления магнитопровода применяют материалы с улучшенными магнитными свойствами при высоких частотах: специальную высоколегированную электротехническую сталь, железоникелевые сплавы типа пермаллой и др. Для уменьшения индуктивности рассеяния используют тороидальные сердечники, имеющие весьма малое магнитное сопротивление.

Типовая мощность трансформатора. В трансформаторах, питающих вентильные преобразователи, по первичной и вторичной обмоткам протекают несинусоидальные токи, содержащие ряд высших гармоник. Это происходит по следующим причинам:

– вентили пропускают ток только в течение полупериода;

– после выпрямителя устанавливают обычно сглаживающий реактор, который обладает значительной индуктивностью, вследствие чего токи в обмотках трансформатора имеют форму, близкую к прямоугольной.

Из электротехники известно, что несинусоидальные токи с помощью рядов Фурье можно разложить на ряд гармонических составляющих или просто гармоник.

Это приводит к тому, что в общем случае токи I_1 и I_2 имеют разные действующие значения, а расчетные мощности $S_{1ном}$ и $S_{2ном}$ обмоток неодинаковы.

Поэтому введено понятие типовой мощности трансформатора S_m, питающего вентильный преобразователь:

$$S_m = 0{,}5(S_{1ном} + S_{2ном}). \tag{4.45}$$

Коэффициент типовой мощности

$$k_m = \frac{S_m}{P_{dном}}, \tag{4.46}$$

где $P_{dном} = U_{dном} I_{dном}$ — мощность, потребляемая на стороне постоянного тока;

$U_{dном}$ и $I_{dном}$ — номинальные значения напряжения и тока на стороне потребителя, т.е. на стороне постоянного тока.

Типовая мощность S_m вентильного трансформатора всегда больше его выходной мощности $P_{dном}$ при его номинальной нагрузке,

так как гармоники вызывают нагрев трансформатора. Вследствие этого габаритные размеры и масса таких трансформаторов всегда больше, чем у трансформаторов с той же номинальной мощностью, но работающих при синусоидальном токе.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия трансформатора?
2. Какие паспортные данные имеются на табличке, укрепленной на трансформаторе?
3. Можно ли использовать трансформатор, если токи обмоток будут меньше указанных в паспорте?
4. Что такое приведенный трансформатор?
5. Какие способы охлаждения применяются в трансформаторах?
6. Какова конструкция магнитопровода?
7. Какие виды обмоток применяются в трансформаторах?
8. Какие изоляционные материалы применяют в обмотках?
9. Как проводят опыт холостого хода?
10. Какие параметры определяют при опыте холостого хода?
11. Как проводят опыт короткого замыкания трансформатора?
12. К каким последствиям приводит аварийное короткое замыкание трансформатора?
13. Какие параметры определяют при опыте короткого замыкания?
14. Как производится регулирование напряжения трансформатором?
15. Каково назначение тяговых трансформаторов?
16. Какие условия работы тяговых трансформаторов?
17. Какие вы знаете разновидности тяговых трансформаторов?
18. Какова конструкция автоматического прессующего устройства?
19. Какова конструкция вводов тягового трансформатора?
20. Каково назначение и устройство сглаживающего реактора?
21. Каково назначение и устройство переходного реактора?
22. Каково назначение и устройство индуктивного шунта?
23. Каковы достоинства и недостатки автотрансформатора?
24. Каково назначение и устройство трансформатора ТРПШ?
25. Какие обмотки содержит трансформатор ТРПШ?
26. Каково назначение трансформатора постоянного тока?

Глава 5. АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

Аккумуляторами называют химические источники электрической энергии многоразового действия, которые накапливают электрическую энергию при пропускании через них электрического тока и затем отдают ее при подключении к ним внешней нагрузки.

В ТПС применяют кислотные (свинцовые) и щелочные никель-железные и никель-кадмиевые аккумуляторные батареи, отличающиеся друг от друга материалом пластин и составом электролита.

Аккумуляторные батареи электровозов и электропоездов предназначены для питания цепей управления, освещения и сигнализации при опущенном токоприемнике, а также для поднятия токоприемника.

Принципы действия кислотного и щелочного аккумуляторов. Простейший *кислотный аккумулятор* состоит из сосуда с водным раствором электролита (серной кислоты H_2SO_4), в который погружены два электрода (положительный и отрицательный).

Принцип действия аккумулятора основан на преобразовании электрической энергии в химическую при пропускании тока через аккумулятор (режим зарядки), а затем химической энергии в электрическую (режим разрядки).

В кислотных аккумуляторах активной массой положительных пластин служит перекись (двуокись) свинца (PbO_2) темно-коричневого цвета, а отрицательных — губчатый (чистый) свинец (Pb) серого цвета. При разрядке ток внутри элемента протекает от отрицательной пластины к положительной, активная масса переходит в сернокислый свинец, на что расходуется серная кислота, вследствие этого плотность электролита снижается. При зарядке протекает обратный процесс. Это можно описать уравнением химической реакции

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \leftrightarrow 2Pb\,SO_4 + 2H_2O.$$

Часть электронов с атомов положительных электродных пластин переходят в раствор электролита, в результате чего на пластинах накапливается потенциал до +1,7 В; часть электронов атомов из раствора электролита переходит на отрицательные пластины,

вследствие чего на них накапливается потенциал до –35 В. Поэтому ЭДС одного элемента заряженного аккумулятора составляет 2,04—2,1 В. При разрядке протекает обратный процесс.

Щелочные аккумуляторы применяются двух типов: никель-железные и никель-кадмиевые. Отрицательные пластины состоят из кадмия, железа и их оксидов. Эти электроды опущены в электролит, состоящий из раствора едкого калия (KOH) или едкого натрия (NaOH). Чаще всего это 20 % раствор KOH в дистиллированной воде с добавлением гидроксида лития (LiOH) плотностью 1,28 г/см^3, увеличивающего срок службы.

Химические реакции зарядки и разрядки никель-железного аккумулятора описываются уравнением

$$Fe + Ni_2O_3 + 3H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_2 + 2Ni(OH)_2.$$

При зарядке потенциал на пластинах повышается до 1,7 В. Разряд пластин допускается до 1,0 В, так как при дальнейшей разрядке происходит их деформация и повреждение. Полностью заряженный аккумуляторный элемент имеет ЭДС около 1,45 В. При нагрузке напряжение на нем сразу уменьшается из-за относительно высокого внутреннего сопротивления. Обычно при разряде его напряжение постепенно уменьшается с 1,2—1,3 В до наименьшего допустимого значения 1,0 В.

Параметры аккумуляторов. Основными параметрами аккумуляторов являются емкость, ампер-часовая отдача, ватт-часовая отдача или КПД, величина ЭДС и напряжение.

Емкостью аккумулятора называется количество электричества, которое можно получить от полностью заряженного аккумулятора при его разряде до минимально допустимого напряжения на зажимах. Емкость измеряется в ампер-часах, т.е. равна произведению разрядного тока на время разрядки. Чем больше поверхность соприкосновения пластины с электролитом, тем больше емкость. Поэтому пластины делают пористыми. На емкость влияет количество пластин, плотность и температура электролита, а также значение разрядного тока.

Аккумулятор при зарядке всегда потребляет больше энергии, чем отдает. Часть энергии расходуется на зарядку аккумулятора, часть — на протекание химической реакции и еще часть преобразуется в теплоту. То же происходит и при разрядке. Величина, характеризующая степень использования количества электричества и энергии (выраженное в процентах), называется *отдачей* аккумулятора.

Значение, показывающее степень использования количества электричества, называется *ампер-часовой отдачей*, а значение, показывающее использование энергии, называется *ватт-часовой отдачей*, или *КПД аккумулятора*.

Для кислотных аккумуляторов ампер-часовая отдача составляет 80—85 %, для щелочных — 60—70 %.

Важным параметром аккумулятора является плотность электролита, измеряемая в г/см^3, т.е количество кислоты или щелочи, находящейся в 1 см^3 электролита. Как известно, плотность воды составляет 1 г/см^3. Плотность электролита кислотного аккумулятора для южных районов — 1,24—1,25 г/см^3; для остальных районов составляет 1,24—1,25 г/см^3 в летнее время и 1,26—1,27 г/см^3 — в зимнее. При разрядке кислотного аккумулятора плотность электролита уменьшается, так как кислотный остаток SO_4 соединяется со свинцом.

Плотность электролита щелочного аккумулятора при зарядке и разрядке не изменяется и при температуре воздуха от −19 до +35 °С составляет 1,19—1,21 г/см^3, а при температуре воздуха от −20 до −40 °С — 1,26—1,28 г/см^3 (без добавления едкого лития). При температуре от +10 до +50 °С используется электролит плотностью 1,17—1,19 г/см^3, состоящий из раствора едкого натра с добавкой едкого лития 15—20 г на 1 л раствора.

Напряжение кислотного аккумуляторного элемента составляет 2—2,1 В. При увеличении плотности электролита ЭДС возрастает. Следует отметить, что чрезмерное повышение плотности электролита снижает срок службы аккумулятора. При нагрузке ЭДС всегда больше напряжения. Эти величины одинаковы только при холостом ходе — разомкнутой цепи.

ЭДС элемента щелочного аккумулятора составляет 1,45 В, при полной зарядке — 1,83 В. При разрядке вначале напряжение быстро падает до 1,3 В, а затем медленно снижается до 1,1 В. При таком напряжении разряд прекращают.

Аккумуляторные батареи. На электровозах и электропоездах постоянного и переменного тока устанавливают, как правило, щелочные и аккумуляторные батареи. Напряжение 50 В на электровозах ВЛ10, ВЛ11, ВЛ80, а на электропоездах — 110 В получают за счет последовательного соединения нескольких десятков аккумуляторных элементов. Их называют *аккумуляторной батареей*.

Аккумуляторная батарея 42НК-125 электровоза ВЛ80[с] состоит из 42 никель-кадмиевых последовательно соединенных элементов, помещенных в двух ящиках под кузовом.

Каждый аккумуляторный элемент (рис. 5.1) состоит из стального запаянного корпуса *7*, помещенного в резиновый чехол *1*, который изолирует аккумуляторные элементы друг от друга. Внутри аккумуляторного элемента помещены блок *8* из шести плюсовых пластин и блок *9* из пяти минусовых пластин. Элемент внутри заполнен электролитом.

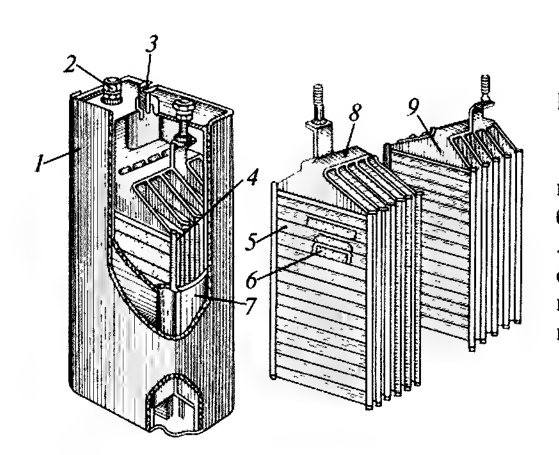


Рис. 5.1. Элемент щелочной аккумуляторной батареи:
1 — резиновый чехол; *2* — выводные шпильки; *3* — пробка; *4* — эбонитовая палочка; *5* — пакет; *6* — активная масса пластин; *7* — стальной корпус; *8* — блок положительных пластин; *9* — блок отрицательных пластин

Каждая плюсовая и минусовая пластина состоит из плоских стальных никелированных трубок (пакетов) с очень мелкими отверстиями, закрепленных в общих рамках. Внутри пакетов *5* помещена активная масса в виде зерен: для плюсовых пластин — гидроксид никеля $Ni(OH)_3$ (с добавлением графита, который улучшает проводимость); для минусовых пластин — кадмий Cd (с добавлением 20 % железа Fe). Благодаря железу предотвращается спекание кадмия при нагревании, а также улучшается его (кадмия) проводимость. Блок плюсовых пластин помещается между блоком минусовых пластин. Все пластины изолированы друг от друга эбонитовыми палочками *4*. Обе крайние плюсовые пластины от стенок и от дна корпуса не изолируются, вследствие чего корпус элемента находится под потенциалом плюсовых пластин и для изоляции помещается в резиновый чехол.

Выводы от блоков плюсовых и минусовых пластин выполнены в виде приваренных шпилек, которые выведены наружу через запаянную крышку корпуса. Между крышкой и шпильками находятся резиновые втулки, изолирующие шпильки от корпуса. Выводные шпильки *2* проходят сквозь корпус через изоляционные втулки. Блок *8* соединен непосредственно с корпусом элемента. Заливку электролита производят через отверстие, расположенное между выводными зажимами. Заливочное отверстие закрыто пробкой *3* на резьбе.

Уровень электролита сверху над пластинами (над сеточкой) должен быть 5—12 мм.

Аккумуляторная батарея состоит из металлического ящика с открывающейся верхней крышкой, в которой расположены аккумуляторные элементы. Ящик внутри покрыт щелочностойкой эмалью. Аккумуляторы соединяют последовательно медными шинами только после окончания установки элементов батареи в ящике и затяжки болтов на торцевой его части. При этом затяжку гайки на шпильке вывода аккумулятора производят с обязательным удержанием вторым ключом нижней гайки вывода во избежание разрушения клеммного узла.

Ящик имеет три патрубка: для подвода провода, подсоединения щелочеотвода и подсоединения газоотвода (трубы) — для отвода газов из батареи.

Элементы установлены в ящике плотно друг к другу и уплотнены деревянными досками и фанерой. Дно ящика покрыто также досками и фанерой, имеющими пазы для стекания разлитой щелочи через щелочеотводящий патрубок.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение аккумулятора на электровозах?
2. Какие виды аккумуляторов применяют в ЭПС?
3. Объясните принципы действия кислотного и щелочного аккумуляторов.
4. Почему щелочные аккумуляторы помещены в резиновые чехлы?
5. Назовите основные параметры аккумуляторов.
6. Что означает термин «емкость аккумулятора», «ампер-часовая отдача»?
7. Каковы достоинства и недостатки кислотных и щелочных аккумуляторов?

Глава 6. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электромашинные преобразователи предназначены для преобразования постоянного тока в однофазный переменный или в многофазный; переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты; постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения.

К электромашинным преобразователям относятся: преобразователи грузовых электровозов постоянного тока, делители напряжения (динамомоторы), преобразователи электропоездов постоянного тока, двигатель-генераторы и электромашинные усилители.

Преобразователь **НБ-436В** устанавливают на грузовых электровозах типа ВЛ10, ВЛ11 и ВЛ15 для питания обмоток возбуждения тяговых электродвигателей при рекуперативном торможении. Преобразователь состоит из двигателя, получающего питание от контактной сети, и генератора, питающего обмотки возбуждения тяговых электродвигателей, которые, в свою очередь, обеспечивают получение магнитных потоков и ЭДС вращения тяговых электродвигателей, необходимых для рекуперативного торможения.

Напряжение на зажимах генераторов преобразователей зависит от системы рекуперативного торможения на электровозе, сопротивления и числа последовательно включенных обмоток возбуждения тяговых электродвигателей, а также от тока возбуждения в этих обмотках.

Двигатели преобразователей имеют смешанное возбуждение — последовательное и независимое. Последовательное возбуждение позволяет ограничить частоту вращения преобразователей в допустимых пределах при включении преобразователей без нагрузки на их генераторах. Технические характеристики преобразователя приведены в табл. 6.1

Преобразователь НБ-436В (рис. 6.1) состоит из шестиполюсного низковольтного генератора постоянного тока и четырехполюсного высоковольтного электродвигателя, смонтированных на одном валу и представляющих собой однокорпусный двухмашинный

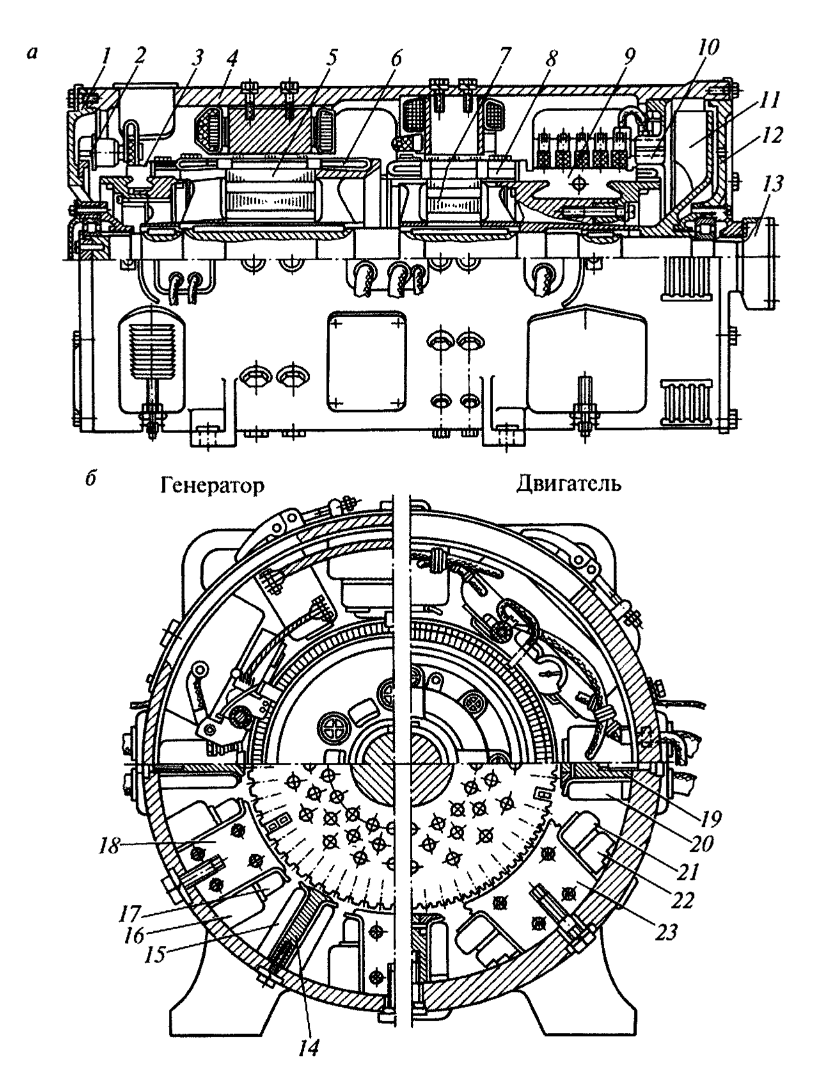


Рис. 6.1. Продольный (*а*) и поперечный (*б*) разрезы преобразователя НБ-436В:

1, *12* — подшипниковые щиты; *2*, *10* — щеточные аппараты двигателя и генератора; *3*, *9* — коллекторы двигателя и генератора; *4* — остов; *5*, *7* — сердечники якорей; *6*, *8* — обмотки якорей; *11* — вентилятор; *13* — реле оборотов; *14*, *19* — сердечники добавочных полюсов; *15*, *20* — катушки добавочных полюсов; *16*, *21* — катушки главных полюсов независимого возбуждения; *17*, *22* — катушки главных полюсов последовательного возбуждения; *18*, *23* — сердечники главных полюсов

агрегат. Цилиндрический остов *4* отлит из стали 25Л-1 и является одновременно магнитопроводом. Для крепления преобразователя к фундаменту имеются специальные лапы, а для транспортировки — приливы с отверстиями. Сердечники главных полюсов двигателя *23* и генератора *18* набраны из рулонной стали Ст2 толщиной 1,5 мм и скреплены стальными заклепками, а сердечники добавочных полюсов *19* и *14* изготовлены из толстолистовой стали Ст2. К остову главные полюса прикреплены стальными шпильками М16, а добавочные — болтами М16.

Таблица 6.1

Технические характеристики преобразователя

Параметры	Двигатель	Генератор
Напряжение на коллекторе, В	3300	38
Ток якоря, А	15	800
Мощность, кВт	40,7	30,4
Сопротивление обмоток при температуре 20 °С, Ом:		
якоря	6,31	0,00331
главных полюсов катушек последовательного возбуждения	9,07	0,00493
главных полюсов катушек независимого возбуждения	1,06	0,62
добавочных полюсов	1,698	0,00162
Класс изоляции по нагревостойкости:		
остова	F	F
якоря	B	B
Частота вращения, об/мин	1290	
Масса, кг	1900	
Сопротивление демпферного резистора, Ом	10	—
КПД, без демпферного резистора, Ом	0,857	0,755

Катушки *22* последовательного возбуждения главных полюсов электродвигателя имеют по 95 витков. Они выполнены из прямоугольного провода ПСД сечением 1,6×3,0 мм, а катушки независимого возбуждения *21* имеют по 234 витка и изготовлены также из прямоугольного провода ПСД сечением 1,6×2,36 мм. Катушки *20* добавочных полюсов имеют по 219 витков и изготовлены из провода ПСД сечением 1,6×3,0 мм. Корпусная изоляция катушек последовательного возбуждения главных и добавочных полюсов состоит из шести

слоев, а катушки независимого возбуждения — из трех слоев стеклослюдинитовой ленты ЛСКН-160-ТТ сечением 0,13×25 мм, уложенной в полуперекрышу. Катушки совместно с сердечником полюсов пропитаны эпоксидным компаундом. Схемы соединения обмоток полюсов электродвигателя приведены на рис. 6.2.

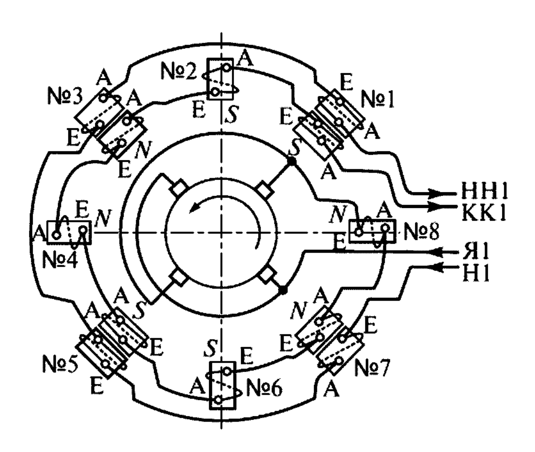


Рис. 6.2. Схема соединения катушек полюсов двигателя преобразователя НБ-436В

Сердечник *5* якоря набран из рулонной электротехнической стали 1312 толщиной 0,5 мм. Он имеет три ряда аксиальных отверстий для прохода вентилирующего воздуха. В пазу сердечника уложена волновая обмотка *6* якоря, состоящая из 49 катушек, намотанных в семь секций в четыре оборота. Применен круглый провод ПЭТВСД диаметром 1,18 мм.

Корпусная изоляция катушек якоря состоит из шести слоев стеклослюдинитовой ленты ЛСЭК-5-СПл толщиной 0,1 мм, уложенной в полуперекрышу, и одного слоя фторопластовой ленты толщиной 0,03 мм, уложенной в четверть перекрыши, а также одного слоя стеклоленты, толщиной 0,1 мм, уложенной встык.

Генератор преобразователя имеет смешанное возбуждение. Магнитная система генератора малонасыщенная. На главных полюсах размещены катушки независимого *16* и последовательного *17* возбуждения.

Катушки *16* получают питание от генератора управления НБ110В и имеют по 280 витков. Корпусная изоляция выполнена из стеклослюдинитовой ленты ЛСКН-160-ТТ сечением 0,13×25 мм в три слоя, уложенной в полуперекрышу. Катушки *17* последовательного возбуждения, обтекаемые током рекуперации тяговых электродвигателей, обеспечивают необходимые характеристики генератора для устойчивой работы цепи. Они включены в две параллельные ветви по три штуки последовательно. Катушки имеют по одному витку и изготовлены из прямоугольного медного провода сече-

нием 3,8×22 мм. Намотку выполняют в два параллельных провода. Корпусная изоляция — стеклослюдинитовая лента в шесть слоев, уложенная в полуперекрышу.

Катушки *15* добавочных полюсов генератора имеют восемь витков и изготовлены из медного провода ПММ сечением 3,55×16 мм. Намотка выполнена в три параллельных провода. Корпусная изоляция — стеклослюдинитовая лента ЛСКН-160-ТТ сечением 0,13× ×25 мм, уложенная в три слоя в полуперекрышу. Схема соединения катушек полюсов генератора приведена на рис. 6.3

Сердечник *7* якоря генератора (см. рис. 6.1) набран из рулонной электротехнической стали 2212 толщиной 0,5 мм. Сердечник имеет три ряда аксиальных отверстий для прохода вентилирующего воздуха. В пазы сердечника уложена петлевая обмотка якоря с уравнителями. Она состоит из 57 катушек, каждая из которых имеет восемь отдельных проводников, расположенных по высоте в два ряда и по четыре проводника в ряду. Изоляция катушек выполнена из стеклослюдинитовой ленты толщиной 0,1 мм, уложенной в два слоя в полуперекрышу, одного слоя фторопластовой ленты толщиной 0,025 мм, уложенной в четверть перекрыши, и одного слоя стеклоленты, уложенной встык. Уравнители изготовлены из провода ПСДК сечением 1,6×5,6 мм и изолированы одним слоем стеклоленты толщиной 0,1 мм, уложенной в полуперекрышу.

Щеточный аппарат *2* электродвигателя унифицирован с щеточным аппаратом электродвигателя ТЛ-110В.

Щеточный аппарат *10* генератора состоит из траверсы поворотного типа с закрепленными на ней шестью пальцами, стержни которых изолированы бакелитовой бумагой. На каждом пальце закреплены пять щеткодержателей, в которых установлено по одной щетке. Траверсу к остову крепят болтами.

Коллектор якоря электродвигателя унифицирован с коллектором электродвигателя ТЛ-110В (кроме размеров шлица). В генераторе коллектор набран из 228 медных пластин, изолированных друг от друга миканитовыми прокладками, а от корпуса — миканитовыми манжетами и цилиндром.

Якорь преобразователя опирается на роликовые подшипники. Конструктивное исполнение подшипникового узла обеспечивает создание в нем камеры для смазки, а также уплотнения для предотвращения утечки смазки из камеры.

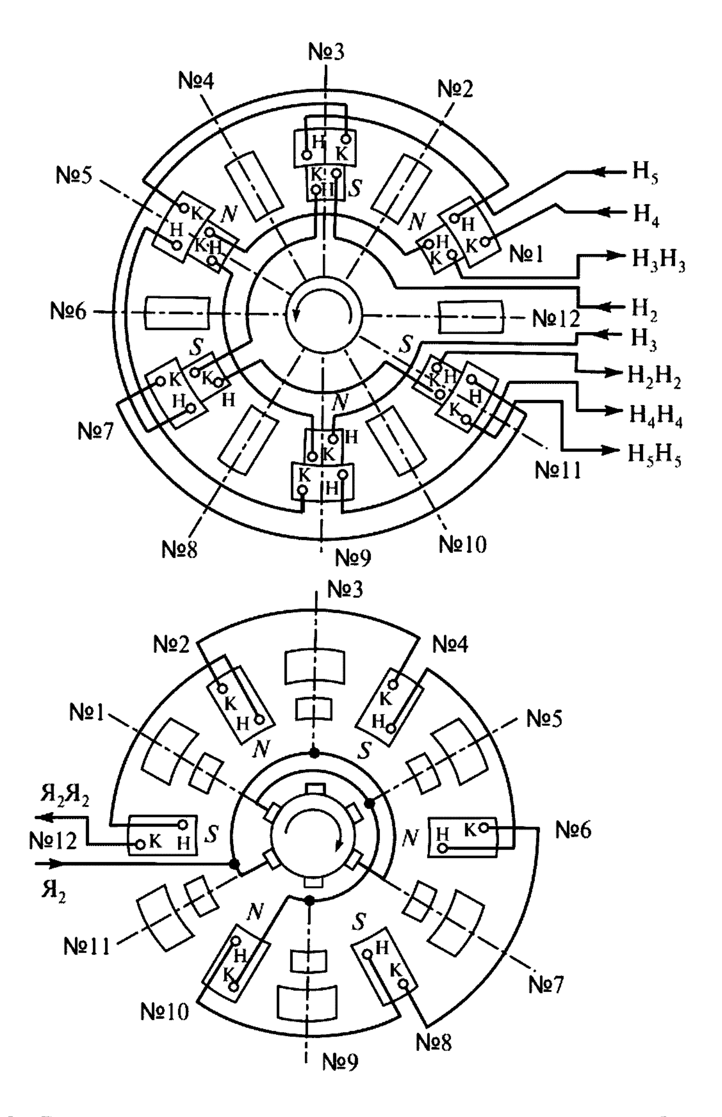


Рис. 6.3. Схема соединения катушек полюсов генератора преобразователя НБ-436В

Для охлаждения машины вентилятор *11* насажен на вал со стороны коллектора генератора. Со стороны генератора на наружной стороне подшипникового щита установлено реле оборотов *13*.

Делитель напряжения (динамотор). Вспомогательные машины электропоездов находятся под кузовом, т.е. в более стесненных условиях, чем внутри кузова локомотива. Электродвигатель привода компрессора с изоляцией на 3000 В имеет большие размеры и его трудно расположить под кузовом, поэтому электродвигатели привода компрессоров выполняют на напряжение 1500 В. Для получения такого напряжения и применяют делители напряжения (динамоторы).

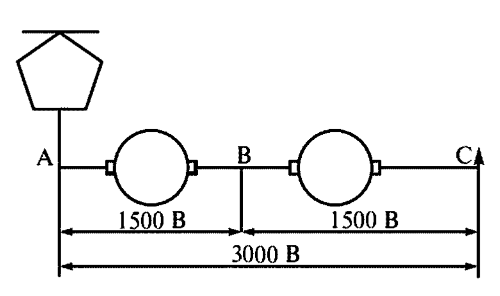


Рис. 6.4. Схема включения динамотора

Если два двигателя, имеющие одинаковые параметры, соединить последовательно и подключить к сети, падение напряжения на каждом двигателе будет одинаковым (рис. 6.4). К точке В, имеющей потенциал 1500 В, подключают двигатель ком-прессора. Если двигатель подключить к точкам А и В, то хотя падение напряжения на двигателе 1500 В, но потенциал точки А составляет 3000 В, поэтому все равно изоляцию двигателя компрессора пришлось бы выполнить на 3000 В.

Для уменьшения габаритов и экономии материалов оба двигателя делителя объединены в одном корпусе динамотора, например типа ДК-604В (рис. 6.5).

Остов динамотора — стальной, литой и с обеих сторон закрыт подшипниковыми щитами *6* и *21*. Якорь — один, но с каждой торцевой стороны имеет по коллектору. Якорных обмоток — две, и каждая из них присоединена к своему коллектору. Главные полюсы — общие. На каждом полюсе имеется по две обмотки: независимого возбуждения и высоковольтная. Коллекторные пластины *7* и *12* изолированы друг от друга миканитовыми прокладками. От втулки и нажимной шайбы коллекторные пластины изолированы пластмассой.

Для изоляции якорных обмоток применяют электрокартон, стеклоэскапоновую и тафтяную ленты. В пазах якоря обмотки удерживаются проволочными бандажами *11*.

Машина содержит четыре главных и четыре добавочных полюса. На поворотных траверсах *5* и *13* закреплены щеткодержатели. Щетки — электрографитированные, марки ЭГ-2А.

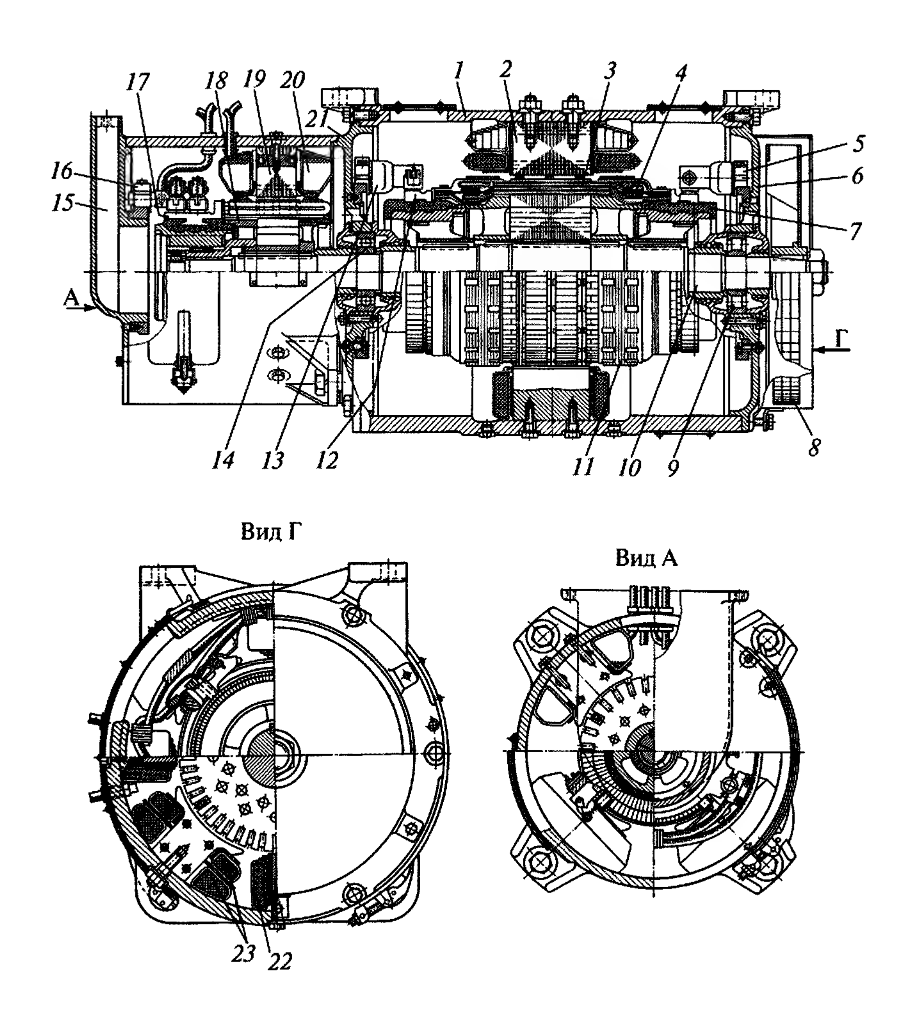


Рис. 6.5. Динамотор ДК-604В с генератором управления и вентилятором: *1* — остов динамотора; *2* — главный полюс; *3* — якорь динамотора; *4* — обмотка якоря динамотора; *5*, *13* — траверсы с щеткодержателями; *6*, *21* — подшипниковые щиты; *7*, *12* — коллекторы; *8* — вентилятор; *9*, *14* — якорные подшипники; *10* — вал; *11* — бандаж обмотки динамотора; *15* — щит генератора; *16* — траверса генератора; *17* — коллектор генератора; *18* — якорь генератора; *19* — остов генератора; *20* — главный полюс генератора; *22* — катушка добавочного полюса динамотора; *23* — катушки главного полюса динамотора

С одного конца вала напрессовано вентиляторное колесо *8*, охлаждающее машину при работе; другой конец вала выполнен удлиненным — на нем смонтирован якорь генератора управления.

Таким образом, динамотор является одноякорным преобразователем.

Генератор управления динамотора выполняет на электропоезде те же функции, что и аналочиная машина на электровозе.

Остов генератора крепят болтами к подшипниковому щиту динамотора. Передняя торцевая сторона закрыта чугунным щитом с патрубком для вентиляции. В остове генератора *19* расположены четыре главных полюса, добавочные полюса отсутствуют. Сердечники полюсов набирают из отдельных листов электротехнической стали. Якорная обмотка закреплена проволочным бандажом. Медные коллекторные пластины генератора *17* собраны на пластмассовом корпусе, армированном стальной втулкой. Четыре щеткодержателя установлены на поворотной траверсе. В каждом щеткодержателе помещено по две щетки.

***Преобразователь* 1ПВ-6У1** преобразует постоянный ток в переменный трехфазный и применяется на всех электропоездах постоянного тока, кроме электропоезда ЭТ2М, на котором установлен преобразователь НВП-44/38.

Генератором переменного тока является синхронный генератор трехфазного тока.

Технические характеристики преобразователей 1ПВ-6У1 и НВП-44/38 приведены в табл. 6.2 (в знаменателе — параметры НВП-44/38).

Таблица 6.2

Технические характеристики преобразователей 1ПВ-6У1 и НВП-44/38

Параметры	Двигатель	Генератор
Напряжение на коллекторе, В	3300	38
Ток якоря, А	19,2/18,4	800
Мощность, кВт	50/44	38
Дополнительное сопротивление в цепи якоря, Ом	18	—
Номинальная частота, Гц	—	50
Число фаз	—	3
Номинальная частота вращения, об/мин	1000	
Режим работы	продолжительный	
Масса преобразователя, кг	1980	2020

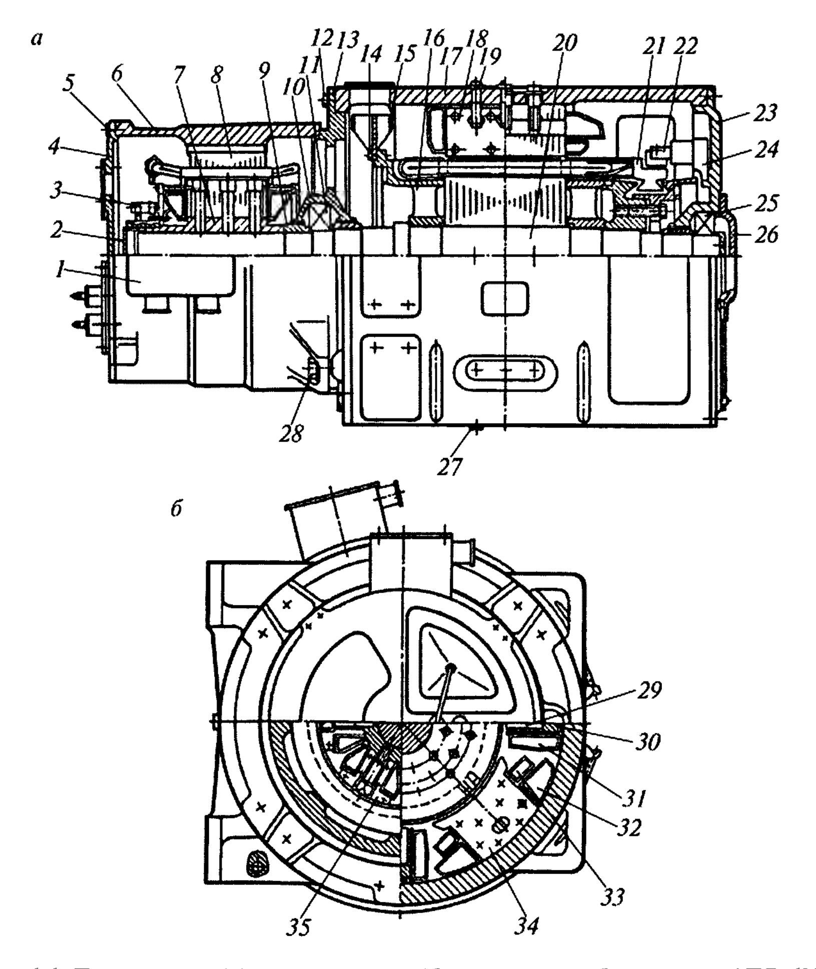


Рис. 6.6. Продольный (*а*) и поперечный (*б*) разрезы преобразователя 1ПВ-6У1: *1* — коробка выводов; *2* — шайба; *3* — пальцы щеткодержателя; *4* — подшипниковый щит генератора; *5*, *12*, *14*, *28* — болты; *6* — станина генератора; *7*, *9* — втулки; *8* — сердечник статора; *10*, *26* — крышки подшипника; *11*, *25* — роликовые подшипники; *13*, *23* — подшипниковые щиты; *15* — вентилятор; *16* — обмоткодержатель; *17* — остов двигателя; *18* — обмотка якоря; *19* — бронзовый болт; *20* — вал; *21* — коллектор двигателя; *22* — щеткодержатель; *24* — траверса; *27* — пробка для слива конденсата; *29* — сердечник добавочного полюса; *30* — латунные прокладки; *31* — катушка добавочного полюса; *32* — катушка независимого возбуждения; *33* — катушка последовательного возбуждения; *34* — сердечник главного полюса; *35* — полюса ротора генератора

Корпус *6* (рис. 6.6) генератора, выполненный из стального литья, прикреплен к подшипниковому щиту *13* двигателя четырьмя болтами *12*. В корпус запрессован сердечник статора *8*, который фиксируется шпонкой, приваренной к корпусу. Сердечник статора набран из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. В сердечнике выштампованы пазы, изолированные двумя слоями электрокартона, толщиной 0,2 мм. В пазы уложены катушки трехфазной обмотки. Изоляция между катушками выполнена из одного слоя электрокартона и одного слоя стеклослюдинита. Катушки в пазах закреплены буковыми клиньями.

Контрольные вопросы

1. Назовите тяговые одноякорные преобразователи.
2. Назовите тяговые двухякорные преобразователи.
3. Каково назначение динамотора?
4. Каково назначение преобразователя электропоезда постоянного тока?
5. Какова конструкция динамотора?

Глава 7. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

При техническом обслуживании машин выполняют осмотр оборудования с целью выявления основных неисправностей при эксплуатации. При устранении неисправностей используют различные методы их выявления, определяют возможности и условия их дальнейшей эксплуатации. При этом производят сушку изоляции обмоток без демонтажа с электровоза, техническое обслуживание щеточно-коллекторного узла и других операции.

7.1. Основные неисправности электрических машин

В процессе эксплуатации тяговых коллекторных электрических машин вследствие внешних воздействий, толчков, ударов и вибраций возникают износ и неисправности. В остове появляются:

– поперечные, продольные и поперечно-продольные трещины, особенно в местах крепления кронштейнов сваркой;

– ослабление или повреждение болтов, крепящих главные и добавочные полюсы, подшипниковые щиты, шапки моторно-осевых подшипников;

– повреждение резиновых прокладок маятниковых опор тяговых электродвигателей.

Искрение на коллекторе. К причинам, вызывающим искрение на коллекторе, изложенным в гл. 2, добавим возможные причины и способы их устранения, которые приведены в табл. 7.1.

Чрезмерный нагрев машины вызывается рядом причин. При перегрузке машины до токов, превышающих допустимые значения перегрева, происходит ускоренное старение изоляции, что ограничивает полное использование мощности машины. При старении изоляции уменьшается ее электрическая прочность, возникают тяжелые повреждения изоляции тяговых электродвигателей, такие как пробои, межвитковые замыкания обмоток якорей, выплавление припоя из «петушков» коллектора, размотка бандажей и разрушение подшипников якоря. Причем если нагрев тяговых элект-

родвигателей повторяется и на других электровозах, то это значит, что неправильно рассчитана масса ведомых поездов.

Таблица 7.1

Причины искрения щеток на коллекторе и способы их устранения

Признаки искрения	Возможная причина	Способы устранения
Искрят все щетки	Щетки установлены неправильно	Проверить положение щеток по заводским меткам, имеющимся на траверсе
	Щетки в неудовлетворительном состоянии и неправильно установлены в щеткодержателях	Необходимо правильно установить щеткодержатели и щетки. Щетки должны быть тщательно пришлифованы к коллектору мелкой стеклянной шкуркой (применение наждачной бумаги не рекомендуется)
	Щетки имеют неровную обгоревшую поверхность с царапинами, забитыми медной пылью. Края щеток обломаны или обгорели	
	Размеры обойм щеткодержателей не соответствуют размерам щеток (слишком велик или слишком мал зазор между щеткой или обоймой щеткодержателя)	Необходимо устанавливать щетки, указанные в паспорте электрической машины
	Слишком велико расстояние между щеткодержателем и коллектором	Правильно установить щеткодержатели. Расстояние между низом щеткодержателя и коллектора должно быть в пределах 2—4 мм. Регулируется в ТЭД смещением щеткодержателя относительно кронштейна по гребенке
	Щеткодержатели слабо закреплены на пальцах траверсы ТЭД	Подтянуть болты, крепящие щеткодержатели к траверсе
	Щетки слабо прилегают к коллектору или чрезмерное нажатие щеток, вызывающее их повышенный износ	Отрегулировать нажатие щеток на коллектор

Продолжение табл. 7.1

Признаки искрения	Возможная причина	Способы устранения
	Установлены щетки не той марки, которая указана в паспорте машины	Установить щетки, соответствующие предписанию завода-изготовителя
	Нажатие на щетки неодинаково, вследствие чего ток между ними распределен неодинаково	Отрегулировать одинаковое нажатие на все щетки
	Наблюдается повышенная вибрация щеточного аппарата и при резонансе значительно увеличивается искрение	Увеличить жесткость щеточного аппарата
	Главные и добавочные полюсы распределены неравномерно	Добиться одинакового распределения полюсов. Оно в ТЭД не должно отличаться более чем на 2 мм
	Несвоевременно проведенная продорожка коллектора	Глубина продорожки должна быть в пределах 1,5—2 мм. После продорожки снять фаски на коллекторных пластинах
	При холостом ходе машина не искрит, а по мере возрастания нагрузки искрение увеличивается	Проверить и установить правильное чередование полярности главных и добавочных полюсов
	Главные и добавочные полюсы чередуются неправильно	Устранить неправильную полярность главных и добавочных полюсов
	Неправильная полярность отдельных главных и добавочных полюсов	
	Короткое замыкание между какими-либо витками добавочных полюсов	Отыскать место замыкания и устранить его
При искрении наблюдается почернение отдельных коллекторных пластин	Плохой контакт отдельных лобовых частей обмотки якоря с «петушками» коллектора	Дефект имеет место при плохой пропайке лобовых частей якоря с «петушками» коллектора. Выполнить качественную пайку
	Отдельные коллекторные пластины выступили или запали	Обточить коллектор

Продолжение табл. 7.1

Признаки искрения	Возможная причина	Способы устранения
	Короткое замыкание в якоре	Выполнить перемотку якоря
	Некоторые уравнители отпаялись	Если после того как пайка «петушков» проверена и исправлена, а коллектор обточен, продолжается почернение одних и тех же пластин, то следует проверить пайку уравнителей
	Обрыв в катушке якоря, находящейся между другими катушками	При обрыве в обмотке заменить неисправную катушку
	Ослабла затяжка коллектора, почерневшие пластины коллектора	Затянуть и обточить коллектор, катушку заменить новой
Щетки искрят, дрожат, сильно шумят; на коллекторе видны следы почернений; коллектор и щетки сильно нагреваются	Коллектор негладкий или бьет. Вся машина вибрирует. Под действием центробежных сил коллектор деформирован; отдельные пластины выступают; затяжка коллектора ослабла	Проверить биение коллектора. Коллектор подтянуть и обточить, изоляцию между пластинами продорожить. Устранить вибрацию машины
	Недостаточная продорожка	Выполнить продорожку коллектора
Легкое круговое искрение; по поверхности коллектора со щеток одного полюса на щетки другого полюса перескакивают искры	Коллектор загрязнен графитовой пылью	Протереть коллектор чистой неволокнистой салфеткой, слегка смоченной бензином, и отшлифовать мелкой стеклянной шкуркой
	Коллектор загрязнен вследствие сильного износа щеток, вызываемого негладкостью коллектора или неподходящими щетками. Загрязнение возможно из-за небрежной чистки и продувки машины после притирки щеток или шлифовки коллектора, а также плохого ухода за машиной	Неровный коллектор отшлифовать или обточить, и продорожить изоляцию между пластинами коллектора; неподходящие щетки заменить новыми. Коллектор содержать в чистоте. После каждой притирки щеток и шлифовки коллектора тщательно очищать и продувать коллектор и щеточный аппарат

Окончание табл. 7.1

Признаки искрения	Возможная причина	Способы устранения
Круговой огонь по коллектору	Щетки расположены неправильно	Необходимо проверить положение щеток
	Установлены щетки не той марки, которая указана в паспорте машины	Установить щетки, указанные в паспорте машины
	Круговой огонь может возникнуть в результате быстрого нарастания тока при переходных процессах, а также в результате образования кругового огня на соседнем параллельном двигателе или при пробое плеча выпрямительной установки	Должна быть правильно отрегулирована система защиты электрооборудования
	Круговой огонь может вызвать режимы ударного включения полного напряжения на предварительно обесточенный тяговый двигатель	Соблюдать режим работы тягового двигателя

При боксовании колесной пары частота вращения якоря тягового электродвигателя резко возрастает, вследствие чего возникают большие центробежные силы, способные вызвать повреждение валов тяговых электродвигателей, соединительных муфт, вентиляторов, а также повреждение или ослабление бандажей, выпадение клиньев из пазов якоря. Кроме того, при повышении частоты вращения якоря заметно усиливается искрение под щетками и создаются условия для кругового огня по коллектору. Если происходит восстановление сцепления боксующей колесной пары, то частота ее вращения резко уменьшается, вследствие чего накопленный запас кинетической энергии превращается в удар, который передается на зубчатую передачу и подшипники, вызывая их поломку или повышенный износ.

При движении тяжеловесного поезда по затяжному подъему, и особенно при трогании с места такого поезда на крутом подъеме, или при движении с отключенными тяговыми электродвигателями на спусках токи в них могут превысить допустимые значения.

В этом случае даже кратковременные перегрузки вызывают повышенное искрение на коллекторе и круговой огонь.

При опорно-осевом подвешивании тяговых электродвигателей при взаимодействии колесных пар с рельсами возникают большие динамические усилия, которые через моторно-осевые подшипники передаются на остов, якорь и другие детали. Эти усилия могут вызвать трещины и обрывы проводников, механическое повреждение изоляции, моторно-осевых и якорных подшипников, нарушения посадки подшипниковых щитов, а также ухудшение коммутации. Иногда встречаются и другие неисправности якорей тяговых электродвигателей, такие как низкое сопротивление изоляции, замыкание коллекторных пластин и пробой изоляции коллектора.

На коллекторе в результате длительной эксплуатации появляются местные выработки, лыски, нарушение нормальной работы щеточного узла, повышенное искрение и даже круговой огонь.

В полюсах и катушках возбуждения встречаются следующие неисправности: замыкание витков и слоев обмоток, низкое сопротивление и пробой изоляции, обрыв и повреждение кабелей, ослабление и разрушение полюсных болтов. В щеткодержателях тяговых электродвигателей и вспомогательных машин постоянного тока возможны: перекрытие электрической дугой изоляторов кронштейнов, пробой изоляции, излом пружин, износ «окон» под щетки.

Электрические неисправности могут быть трех видов: короткое замыкание, обрыв электрической цепи, постороннее питание или, образно говоря, «нет контакта, где он должен быть, и есть контакт, где его не должно быть». Короткие замыкания возникают при соединении друг с другом двух проводников постоянного тока разной полярности либо двух или трех фаз переменного тока. В результате короткого замыкания резко снижается сопротивление цепи и возникают недопустимо большие токи, повреждающие провода и включенные в эту цепь электрические аппараты. Причины коротких замыканий различные. Это загрязнение, перетирание, увлажнение или старение изоляции, атмосферные или коммутационные перенапряжения, попадание на токоведущие части металлических предметов, а также потери полупроводниковыми приборами запирающих свойств. При коротком замыкании возрастает величина тока до аварийного значения. При несвоевременном срабаты-

вании аппаратов защиты большой ток к.з. может вызвать повреждение электрооборудования и привести к пожару.

При увеличении тока возрастает величина магнитного потока, возникающего вокруг проводника с током, что приводит к появлению значительных сил, способных повредить подшипники, разрушить бандажи якорей электрических машин, заклиниванию зубчатой передачи или буксовых подшипников колесных пар, резком снижении частоты вращения роторов электрических машин.

Причинами обрыва проводов могут быть их перегибы, сильные натяжения, трение изоляции о металлические предметы, а также обгорание или отпаивание наконечника, сильное окисление контактов и попадание между ними посторонних предметов. Обрывы проводов приводят также к серьезным последствиям, хотя и к менее опасным, чем при коротком замыкании. Например, нельзя включить некоторые тяговые электродвигатели или вспомогательные машины, поднять токоприемник и т.п., так как отключаются соответствующие системы защиты. Обрывы проводов силовой цепи можно устранить только в условиях ремонтного депо.

Постороннее питание электрической цепи возникает при повреждении изоляции одного или нескольких проводов и замыкании этим проводом других проводов. При этом происходит включение аппарата или электрической машины, которые не должны включаться при нажатии на ту или иную кнопку либо включаются сразу после поднятия токоприемника или включения главного (ГВ) или быстродействующего (БВ) выключателей.

При возникновении коротких замыканий, обрывов проводов, постороннего питания в пути следования локомотивная бригада должна сделать запись в Журнале технического состояния формы ТУ-152 с указанием места аварии. В соответствии с записью в депо предполагаемое место тщательно осматривают и по брызгам металла или возможному запаху горелой изоляции устанавливают причину неисправности и устраняют ее. Для обнаружения неисправности наряду с визуальным методом применяют различные измерительные приборы, такие как мегомметры, тестеры, осциллографы, также прозвоночные лампы и т.п.

При работе электрических машин происходит их механический износ. Изнашиваются подшипники, щетки, рабочая поверхность коллектора, внутренняя поверхность окон щеткодержателей. При работе

щеточного аппарата происходит износ щеток с выделением графитовой пыли, которая покрывает поверхность кронштейнов щеткодержателей, образуя токопроводящие мостики, что приводит к перебросу электрической дуги, в результате чего кронштейны щеткодержателей повреждаются. Переброс возможен и на траверсу щеткодержателей и даже на остов двигателя, что можно обнаружить при осмотре щеткодержателей, траверсы, остова. На щетках возможно появление сколов рабочей поверхности вследствие плохого состояния коллектора. Во вспомогательных машинах постоянного тока, которые, как правило, не реверсируются, возможно заедание щетки в окне щеткодержателя. Это приводит к потере контакта щетки с коллектором или увеличивается сопротивление переходного контакта.

При чрезмерном износе якорных подшипников изменяется зазор между якорем и полюсами, что может привести к задеванию якоря о полюса. Происходит повреждение бандажей якоря, их разматывание и в дальнейшем возможно заклинивание тягового электродвигателя.

Из других механических повреждений возможны обрыв болтов полюсов и кронштейнов щеткодержателей, потеря крышек смотрового люка, задир или рассыпание коллектора, ослабление крепления подшипниковых щитов, излом вала якоря, излом деталей щеткодержателей. Некоторые неисправности ликвидируют в депо, а другие, такие как рассыпание коллектора, устраняют в условиях заводского ремонта.

О повреждении якорных подшипников в эксплуатации чаще всего свидетельствуют следы нагрева крышки подшипника и попадание смазки внутрь остова. Для контроля за исправностью подшипников применяют различные приборы вибродиагностики. Если повреждения значительны, то их можно определить по просадке вала, что можно выявить посредством пластинчатого или шарикового щупа.

Сушка увлажненной изоляции обмоток. На электрические машины ЭПС в процессе эксплуатации воздействуют следующие факторы: солнечная радиация, температура воздуха, атмосферные осадки, атмосферное давление, наличие в окружающем воздухе пыли и других загрязнений.

Работа ТЭД при высоких температурах ведет к ускорению старения изоляционных материалов. Высокая температура влияет на

характеристики смазочных материалов, нарушает монолитность сложных узлов, ухудшает физико-механические свойства материалов, применяемых в конструкции ТЭД. При низких температурах из-за увеличения жесткости пути и дефектов рельсов, повышается динамическое воздействие на ТЭД, особенно при опорно-осевом подвешивании.

Высокая влажность воздуха ухудшает сопротивление изоляции, часто вызывая ее пробой. При высокой влажности в сочетании с низкой температурой на внутренней поверхности ТЭД образуется иней, а в трещинах изоляции даже лед, способный разорвать ее. Особую опасность представляют трещины с накопившейся в них токопроводящей пылью. Поэтому для повышения надежности и долговечности электрических машин необходимо периодически восстанавливать свойства изоляции, производя очистку, сушку и пропитку ее лаками или компаундами.

Очистку элементов электрических машин выполняют различными методами. Так, после разборки ТЭД остовы и якори сначала очищают от пыли и грязи, обдувая их в продувочной камере сжатым воздухом. После обдувки якорь и остов очищают вручную, протирая их техническими салфетками или ветошью, смоченными в бензине (при протирке изоляции) или в керосине (при очистке металлических элементов ТЭД).

Обмытый якорь устанавливают в специальной камере и подвергают сушке теплым воздухом. Назначение сушки — восстановление изоляции путем удаления влаги. Для получения теплого воздуха используют специальные калориферы. В депо в некоторых случаях сушат изоляцию якорей электрическим током. При этом локомотив перемещают по деповским путям на малых позициях контроллера машиниста, слегка подтормаживая колесные пары.

Перед сушкой изоляции обмоток электродвигатель (и его составные части) продувают сжатым воздухом, доступные участки якоря и магнитных систем, щеткодержатели и их пальцы очищают от пыли, замасливания, грязи и других загрязнений.

При низком сопротивлении изоляции сушка ТЭД под электровозом проводится сухим нагретым воздухом, получаемым от калориферной установки.

Начинать сушку изоляции необходимо при температуре около +50 °C, постепенно увеличивая до +90—100 °C. Расход возду-

ха для каждого ТЭД должен составлять от 15 до 20 $м^3$/мин. При сушке обмотки нагреваются постепенно (поднимать температуру не следует более чем на 10 °С в течение 1 ч). При быстром нагревании разница в постоянных времени нагрева и в коэффициентах линейного расширения обмотки и активной стали, а также конструктивных частей электродвигателя может привести к повреждениям в виде разрыва изоляции.

Измерение температуры и сопротивления производится в начале сушки через каждые 30 мин, а при установившейся температуре — через 1 ч. Во время сушки замер изоляции производится только мегомметром на 500 В.

Сопротивление изоляции обмоток во время сушки сначала понижается вследствие испарения влаги, а затем повышается и наконец становится постоянным или незначительно изменяется в сторону повышения. Ни в коем случае нельзя прекращать сушку при продолжающемся понижении сопротивления изоляции. При установившемся значении сопротивления изоляции обмоток сушку необходимо продолжать еще не менее трех-пяти часов. В течение этого времени сопротивление изоляции не должно меняться.

Во время сушки крышки смотровых люков должны быть закрыты. Для сушки изоляции обмоток внешним обогревом электродвигатель в сборе со снятыми крышками смотровых люков или отдельно якорь, магнитную систему, главный или добавочный полюсы помещают в вентилируемую сушильную камеру с температурой от 100 до 110 °С.

После окончания сушки проверяют сопротивление изоляции мегомметром. Минимальное сопротивление изоляции обмотки якоря, обмоток возбуждения главных и добавочных полюсов, компенсационной обмотки, которое замеряют при температуре 130—135 °С, должно быть не ниже 1 МОм. Если сопротивление изоляции ниже, то сушку продолжают.

7.2. Порядок обслуживания электрических машин электровозов и электропоездов

Техническое обслуживание тяговых электродвигателей постоянного тока НБ-418К6, ТЛ-2К, НБ-514 электровозов. При наружном осмотре сначала проверяют исправность действия замков коллекторных люков, болтовые крепления моторно-осевых букс, кожухов

зубчатой передачи, главных и добавочных полюсов, подшипниковых щитов, кронштейна подвески. Внутренние узлы электродвигателей осматривают, как правило, когда электровоз стоит в депо на канаве. Кроме того, через верхний коллекторный люк осмотр можно произвести и без установки электровоза на канаву. Перед осмотром поверхности около коллекторных люков и крышки этих люков тщательно очищают от пыли, грязи, снега и т.п., после чего снимают крышку и осматривают якорь, коллектор, щеткодержатели, щетки, кронштейны и пальцы кронштейнов, расположенные напротив смотрового люка, а также видимую часть траверсы и полюсных катушек.

Техническое обслуживание коллекторно-щеточного узла. Нормально работающий коллектор должен иметь полированную блестящую поверхность (политуру) коричневого оттенка (см. с. 43) без царапин, рисок, вмятин, затяжки меди в межламельное пространство и подгаров.

Сначала мягкой, слегка смоченной в техническом спирте или бензине салфеткой удаляют грязь и следы смазки. Таким же образом очищают изоляцию переднего конуса, подгоревшие и поврежденные места конуса, зачищают стеклянной шкуркой и окрашивают изоляционной эмалью до получения глянцевой поверхности. Недопустимо применять для протирки материалы, оставляющие жирные следы.

Небольшие царапины, выбоины и подгары на рабочей поверхности коллектора устраняют шлифовальной шкуркой, закрепленной на специальной деревянной колодке, имеющей радиус, близкий к радиусу коллектора, и ширину не менее $^2/_3$ длины рабочей поверхности коллектора. Зачистку рекомендуется производить на вращающемся коллекторе — в противном случае можно вызвать образование местных выработок. Однако шлифовка уничтожает политуру, ухудшая тем самым контакт между коллектором и щетками, поэтому к ней прибегают при особой необходимости. Вместо шлифовки допускается производить полировку вращающегося коллектора брезентом при помощи деревянной колодки, имеющей радиус, равный радиусу коллектора.

Удаление заусенцев из межламельного пространства коллектора производят неметаллической щеткой или кистями, например капроновыми. При этом чешуйки меди загибают щеткой в ламель-

ное пространство, затем с помощью сжатого воздуха поднимают их вновь. Операцию повторяют 2-3 раза до излома чешуек меди от затяжки. Крупные заусенцы от затяжки меди удаляют специальным ножом для снятия фасок.

Для устранения неисправностей, вызванных перебросом и воздействием кругового огня, тяговый электродвигатель снимают с электровоза и производят ремонт в соответствии с заводскими инструкциями.

В случае повышенного износа всех щеток или щеток одной стороны тщательно осматривают коллектор и замеряют его биение. Причиной повышенного износа щеток может быть недостаточно тщательная обработка коллектора или выступание отдельных коллекторных пластин. При выступании миканитовых пластин выполняют продорожку коллектора.

При обнаружении неисправности щеткодержателей или изношенных щеток продолжают осмотр остальных щеток и щеткодержателей, проворачивая траверсу. Щетки заменяют на новые той же марки, которая указана в инструкции завода-изготовителя. После установки щеток выполняют их пришлифовку мелкозернистой шкуркой. Применение крупнозернистой шкурки недопустимо. Аналогично выполняют техническое обслуживание тяговых электродвигателей электропоездов.

После осмотра тягового электродвигателя смотровые люки закрывают, убеждаются в плотном прилегании крышек к остову и проверяют исправность запирающих устройств. Обращают внимание на целостность брезентовых вентиляционных патрубков, надежность их крепления и плотность прилегания; не допускаются обрывы и прорези брезентовых патрубков.

Техническое обслуживание тяговых электродвигателей с опорно-рамным подвешиванием НБ-520, ДТК-800КЭ включает те же работы, что и при техническом обслуживании тяговых электродвигателей НБ-418К6, НБ-514 и ТЛ-2К.

При ТО-2 производят следующие работы. Проверяют надежность крепления крышек коллекторных люков, плотность их прилегания к остову. Неисправные уплотнения ремонтируют или заменяют. Проверяют крепление главных и добавочных полюсов, подшипниковых щитов и их крышек. Определяют температуру нагрева якорных подшипников (не более 80 °С). Проверяют целостность

брезентовых вентиляционных патрубков, надежность их крепления и плотность прилегания. Обрывы и прорези брезентовых патрубков не допускаются.

Техническое обслуживание тяговых и вспомогательных асинхронных электродвигателей, а также расщепителей фаз электронасосов выполняется без снятия их с электровоза и предназначено для проверки технического состояния и поддержания их в чистоте.

Все виды технического обслуживания и текущего ремонта необходимо совмещать с видами технического обслуживания (ТО) локомотива.

Сопротивление изоляции цепей электродвигателя относительно корпуса и фазами измеряется мегомметром на напряжение 1000 В. При этом величина сопротивления должна быть:

– не менее 20,0 МОм в практически холодном состоянии для нового электродвигателя;

– не менее 1,0 МОм в практически холодном состоянии в эксплуатации и перед вводом электровоза в эксплуатацию после длительного отстоя;

– не менее 1,0 МОм в нагретом состоянии.

При ТО-1, ТО-2 производят внешний осмотр, очистку снаружи от пыли и грязи, проверяют нагрев статора и подшипниковых щитов (на ощупь), а также проверяют крепление двигателей к каркасу и состояние заземления.

Во включенном состоянии проверяют на слух работу электродвигателя, при которой не должно возникать посторонних шумов и стуков.

Техническое обслуживание тяговых электродвигателей и вспомогательных электрических машин электропоездов. При ТО-3 сразу после постановки электропоезда на ремонтную позицию, опускания токоприемников и снятия напряжения с контактного провода проверяют нагрев (на ощупь или специальными термометрами) крышек подшипниковых щитов электрических машин, который должен быть не более 80 °С.

Тяговые электродвигатели осматривают снаружи, обращая особое внимание на выводные кабели, вентиляционные и выхлопные патрубки. Убеждаются в отсутствии трещин в остове, исправном состоянии и надежном креплении выводных кабелей, клиц и болтов, крепящих сердечники полюсов; ослабление полюсных бол-

тов не допускается. Не допускается также трение выводных кабелей между собой или о какие-либо детали и чрезмерное натяжение кабелей. Расстояние от выводных концов кабелей тяговых электродвигателей до оси колесной пары должно быть не менее 100 мм.

Проверяют крепление тягового электродвигателя, подшипниковых щитов; ослабление крепления щитов и обрыв болтов не допускается.

Вспомогательные электрические машины осматривают, проверяют их подвеску и крепление, а также крепление полюсов и шунтов заземления. Очищают сетки вентиляционных отверстий от грязи, при необходимости продувают сжатым воздухом давлением от 0,25 до 0,30 МПа. При проверке остовов и подшипниковых щитов обращают внимание на появление трещин, ослабление крепления щитов и обрыв болтов.

Открывают крышки коллекторных люков и проверяют состояние крышек и их уплотнений, замков, плотность прилегания крышек; неисправности устраняют. Проверяют исправность и крепление корпусов, кронштейнов и пружин щеткодержателей, изоляторов, щеток. Кронштейны с изоляторами, имеющими повреждения глазури, трещины или ослабления в посадке, заменяют. Кронштейны из пластмассы с закопченной поверхностью зачищают и покрывают электроизоляционной дугостойкой эмалью, а кронштейны с повреждением пластмассы более 20 % — заменяют.

Щеткодержатели, имеющие трещины, неисправные пружины и шунты, разработанные окна под щетки, ослабшие сухари пальцев, заменяют.

Щетки, изношенные по высоте более допустимых норм, имеющие отколы более 10 % контактной поверхности, а также ослабление заделки или обрыв более 15 % сечения жил шунтов, заменяют. Вновь установленные щетки притирают по коллектору. Не допускается установка щеток разных марок на одну электрическую машину.

Доступные межкатушечные соединения осматривают, ослабшие соединения закрепляют. Проверяют посадку катушек на сердечники полюсов, ослабление посадки катушек не допускается.

При осмотре коллектора обращают внимание на вылет изоляционного конуса, бандажи и клинья крепления обмотки якоря.

Коллектор очищают от загрязнений капроновой щеткой и протирают смоченной в бензине салфеткой. Затем устраняют следы перебросов электрической дуги, снимают фаски, зачищают и отшлифовывают коллектор.

Проверяют состояние и крепление вентиляторов. Запрещается эксплуатация электрических машин с ослабшим или поврежденным вентилятором.

Измеряют сопротивление изоляции цепей тяговых электродвигателей и высоковольтных аппаратов.

Контрольные вопросы

1. Появление каких неисправностей остова тяговых коллекторных машин возможно при эксплуатации?
2. Каковы причины искрения на коллекторе?
3. Каковы причины нагрева тяговых электрических машин?
4. Какие виды работ выполняют при ТО-1 коллекторных ТЭД?
5. Как производят сушку электрических машин?
6. Какие виды работ выполняют при ТО-2 коллекторных электрических машин?
7. Какие виды работ выполняют при ТО-3 коллекторных электрических машин?

Глава 8. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ ТЯГОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

8.1. Технологии ревизии, технического обслуживания и ремонта тяговых трансформаторов, сглаживающих и переходных реакторов и индуктивных шунтов

При ревизии трансформатора производят его вскрытие, осмотр, проверку, устраняют обнаруженные неисправности и выполняют герметизацию активной части. Для этого тяговый трансформатор снимают с ЭПС и направляют в трансформаторное отделение депо. Перед тем как снять трансформатор с электровоза закорачивают выводы его вторичной обмотки, снимают емкостные заряды и заземляют штангой ввод высоковольтной обмотки. На электровозах ВЛ-60^{к}, ВЛ80^{к}, ВЛ80^{т} и ВЛ80^{с} снимают главный контроллер, переходной реактор и отсоединяют от трансформатора воздуховоды и кабели.

В трансформаторном отделении трансформатор протирают от пыли и грязи ветошью, смоченной в бензине, и тщательно осматривают. При обнаружении на изоляторах повреждений глазури или сколов длиной более 10 % пути возможного перекрытия — их заменяют; при меньшей длине повреждений глазури изоляторы зачищают и окрашивают изоляционной эмалью.

При осмотре бака выявляют пробоины и места течи масла в баке, а также в расширителе, охлаждающей системе, кране, фланцах и выводах. При обнаружении мест течи масла в сварных швах и других деталях проводят дополнительную проверку способом избыточного давления масляного столба. Предварительно отбирают пробу масла для испытания. Для этой цели устанавливают трубу диаметром 1—1$^{1}/_{2}$″ с воронкой над отверстием пробки в крышке расширителя и заливают в воронку масло до образования в трубе столба масла высотой 0,3 м. Затем в течение 15 мин наблюдают за уплотнениями; появившуюся течь устраняют и повторяют испытания. Места просачивания на баке, заполненном разогретым маслом, помечают мелом. Трещины в баке заваривают после слива

масла и промывки бака. Заваренные места снаружи закрашивают мелом, а с другой стороны смачивают керосином; если керосин проступает на меловой обмазке, выполненная сварка непригодна.

В случае попадания внутрь трансформатора при вскрытии каких-либо металлических деталей необходимо активную часть поднять и полностью слить масло из бака. Поэтому при работах, связанных с вскрытием трансформатора, надо осторожно обращаться с гайками, болтами, шайбами, шлинтами и другими деталями, а ручной инструмент привязывать. Упавшие в бак и неизвлеченные оттуда металлические детали могут привести к аварии.

При необходимости выполнения сушки изоляции трансформатора ревизию проводят после ее окончания. При вскрытии трансформатора для ревизии его активная часть контактирует своздухом, т.е. увлажняется, поэтому время ревизии ограничивается.

Ревизию в трансформаторном отделении при температуре 20 °С и выше и относительной влажности воздуха до 65 % производят без прогрева активной части. В этом случае трансформатор выдерживают в помещении до вскрытия в течение времени, необходимого для выравнивания температур. При температуре воздуха в помещении от 0 до 20 °С перед ревизией активную часть прогревают до температуры, превышающей на 10 °С и более температуру воздуха. В случае когда относительная влажность воздуха более 80 %, в течение всего времени ревизии должен быть обеспечен подогрев активной части с превышением любой температуры окружающего воздуха не менее чем на 10 °С.

Температура активной части измеряется на верхнем ярме магнитопровода. Если температура в помещении более высокая, чем температура активной части, то на ней будут конденсироваться пары воздуха, приводящие к увлажнению изоляции обмоток. Поэтому активная часть трансформатора может находиться вне бака не более семи часов.

Перед выемкой активной части из бака масло сливают и перекачивают по трубопроводам трансформаторного отделения. Для предотвращения появления зарядов статического электричества при сливе масла (или при наполнении им бака) выводы обмоток необходимо соединить с баком проводом с сечением не менее 1,5 мм^2. После этого чалочным приспособлением приподнимают активную часть на $^3/_4$ высоты и дают маслу стечь в бак, затем окончатель-

но поднимают и устанавливают в трансформаторном отделении на поддон с деревянным настилом.

Внутреннюю поверхность и дно бака очищают от грязи и промывают сухим трансформаторным маслом. Краны для заливки и слива масла осматривают, тщательно очищают и плотно закрывают. После очистки от загрязнений проверяют крепление фарфоровых изоляторов.

Производят тщательный осмотр бака и активной части. Проверяют все болтовые крепления, ослабшие подтягивают. При сильном загрязнении активной части, включая обмотки, ее промывают чистым сухим подогретым трансформаторным маслом. Допустимо предварительно удалить остатки масла деревянным скребком.

К неисправностям магнитопродов относятся: увеличение тока холостого хода, «пожар стали» вследствие ослабления шихтованного пакета, а также нарушения изоляции между отдельными пластинами стали или изоляции стяжных болтов.

В узлах трансформатора могут быть обнаружены следующие дефекты: в обмотках межвитковые замыкания и замыкания на корпус, обрыв цепи. Причинами дефектов могут быть естественное старение и износ изоляции, систематические перегрузки трансформатора, увлажнение масла или понижение его уровня, внутренние и внешние перенапряжения, деформации обмоток вследствие динамических нагрузок при сквозных коротких замыканиях. Обрыв цепи просходит в результате низкого качества соединения отводов или из-за электродинамических нагрузок при коротких замыканиях. Выводы катушек должны располагаться на расстоянии 5—10 мм один от другого. Осматривают также стяжные косынки, шпильки, защитные фартуки.

После устранения неисправностей активной части ее плавно опускают в подготовленный бак, строго соблюдая горизонтальность положения на стропах. После фиксации в баке активной части и проверки качества резиновой прокладки в разъеме бака производят затяжку болтов на прокладках.

Транспортируемые отдельно расширитель, электронасос, радиаторы охлаждения испытывают и промывают на месте монтажа только в случае обнаружения повреждений или нарушения герметизации. Радиаторы промывают трансформаторным маслом и ис-

пытывают давлением масла в трубе. В масляном насосе проверяют плотность крепления шпилек, надежность соединения выводных кабелей, исправность обмотки статора, его трубопроводы продувают сжатым воздухом.

Все уплотнения из маслостойкой резины заменяют.

Проверяют состояние сигнализирующего манометрического термометра, а также манометра. Неисправные приборы ремонтируются или заменяются.

Измеряют сопротивление изоляции обмоток между собой и по отношению к корпусу, которое должно соответствовать установленным нормам. При удовлетворительном сопротивлении изоляции обмоток производят проверку электрической прочности изоляции испытательным напряжением в соответствии с нормами.

При *ревизии тяговых трансформаторов электровозов серии ЧС-4* равномерно подтягивают болты сжатия обмотки с моментом затяжки 120—130 Н×м, после чего контргайки затягивают, а резьбу закернивают. При ослаблении стяжки магнитопровода затягивают болты в нижней части стяжной рамы по обеим сторонам нижней части бака.

Воздухоосушитель трансформатора электровоза ЧС-4 заправлен влагопоглощающим веществом-реагентом, состоящим из мелкозернистой смеси с размером зерен от 3 до 10 мм силикагеля и блаугеля. При потере влагопоглощающих свойств реагент заменяют или регенерируют. Регенерацию осуществляют в сушильном шкафу или прокаливанием над открытым огнем в течение 2—3 ч при температуре 120—180 °С. Сушку заканчивают после изменения цвета реагента с розового на синий. После сушки воздухоосушитель быстро собирают, а масляный затвор заполняют чистым сухим маслом до уровня, обозначенного на затворе.

В заключение ревизии трансформатор заливают чистым сухим маслом. После заливки отбирается проба масла для определения электрической прочности, а по истечении 12 ч после нахождения масла в трансформаторе берется еще одна проба для анализа его качества в соответствии с требованиями Инструкции по применению смазочных материалов на локомотивах и моторвагонном подвижном составе. Электрическая прочность масла должна быть не ниже 40 кВ. Сопротивление изоляции обмоток должно быть не ниже 30 МОм (при 20 °С). Затем производят проверку диэлектричес-

кой прочности изоляции обмоток испытательным напряжением переменного тока с частотой 50 Гц в течение 1 мин.

После этого трансформатор устанавливают на ЭПС и проверяют надежность заземления бака трансформатора на корпус локомотива, работу масляного насоса и правильность направления его вращения.

При *ревизии активной части трансформатора электровозов серии ЧС* выполняют следующие работы:

– активную часть тщательно осматривают для определения поверхностного состояния изоляции витков катушек и выводов;

– проверяют крепление обмоток, ослабшие гайки подтягивают, ослабшие выводы закрепляют;

– очищают загрязненные поверхности обмоток, магнитопровода и всех выводов;

– проверяют состояние изоляции обмоток между собой и относительно магнитопровода мегомметром;

– проверяют состояние заземления активной стали;

– заменяют поврежденные проходные изоляторы;

– очищают и обезжиривают с обеих сторон изоляционную плиту полосовых выводов;

– промывают сухим и чистым трансформаторным маслом активную часть трансформатора.

Не допускается работа ЭПС при пониженном уровне трансформаторного масла, электрической прочности масла ниже 25 кВ, чрезмерном шуме при работе, повреждении изоляторов, после вторичного срабатывания защиты (если неисправность не выявлена и не устранена), а также при повышенной температуре масла (при работающем электронасосе).

При ***техническом обслуживании*** (ТО-1, ТО-2) ***тягового трансформатора*** проверяют состояние вводов, протирают изоляторы салфеткой. Проверяют и при необходимости подтягивают ослабленные соединения проводов и шин. Глубокие выжоги и наплывы на шинах не допускаются.

Проверяют систему охлаждения, выявляют места течи масла. Равномерно подтягивают ослабленные резиновые соединения.

Проверяют по маслоуказателю наличие масла в расширителе, а также в кармане термобалона манометрического термометра МСМ-100, при необходимости добавляют масло. Доливаемое мас-

ло должно соответствовать действующим национальным стандартам и иметь электрическую прочность не ниже 35 кВ.

При ***текущем ремонте тяговых трансформаторов*** ТР-1 производят работы, предусмотренные техническим обслуживанием ТО-1 и ТО-2, и дополнительно осматривают изоляторы. Заменяют фарфоровые изоляторы, имеющие сколы или повреждения глазури на длине свыше 15 %, трещины или ослабления армировки. Протирают места повреждения глазури салфеткой, смоченной в бензине, и покрывают эмалью ГФ-92КК.

Отбирают пробу масла для анализа. Механические примеси и взвешенный уголь не более 0,007 %.

При текущем ремонте ТР-2 производят те же работы, что и при ТР-1, и дополнительно замеряют сопротивление изоляции всех обмоток относительно корпуса и между собой. Снижение сопротивления изоляции в эксплуатации допускается не более 30 % от паспортных данных.

При текущем ремонте ТР-3 производят работы в объеме ТР-2. Кроме того, сливают масло из бака, отвинчивают гайки болтов, крепящих крышку к баку. Снимают заглушки и отворачивают на несколько оборотов две шпильки упоров в нижней части торца бака. Поднимают активную часть и ставят на поддон.

Проверяют прессовку обмоток — штанга прижима автоматического прессующего устройства должна стоять наклонно. При необходимости усиления прессовки надевают по две шайбы на шпильки прижима, навинчивают по две гайки М20 до упора, подтягивают специальные винты на ярмовой балке с усилием, обеспечивающим удержание пружин в сжатом положении, затем снимают шайбы и гайки М20. Проверяют состояние демпферов вводов, при необходимости заменяют. Трещины в местах изгиба не допускаются. Проверяют резьбовые соединения и крепления деревянных планок. Отсоединяют заземление и проверяют сопротивление изоляции ярмовых балок по отношению к магнитопроводу и ярмовым балкам. Проверяют целостность заземления и его подсоединение.

Проверяют омическое сопротивление обмоток и отсутствие в них обрывов. Снимают электронасос для отдельной ревизии. Охладительную систему разбирают и промывают, изношенные прокладки заменяют, грязь с внутренних стенок балки-камеры удаля-

ют. Полностью удаляют также грязь из бака и расширителя, промывают их маслом.

В заключение опускают активную часть в бак, закрепляют и заливают маслом.

При ***ревизии переходных и сглаживающих реакторов, индуктивных шунтов и специальных трансформаторов***, регулируемых подмагничиванием шунтов ТРПШ, очищают их поверхность от пыли и грязи, проверяют отсутствие межвитковых замыканий катушек, повреждений изоляции, трещин в шинах и ослабление контактов электрических соединений, выполняют измерение сопротивлений изоляции обмоток.

При текущих ремонтах ТР-1, ТР-2 вышеперечисленных аппаратов производят все работы, предусмотренные ТО-1 и ТО-2. Проверяют состояние изоляционных поверхностей, катушек, магнитопроводов, шпилек. Нарушенные покрытия подкрашивают электроизоляционной эмалью.

При текущем ремонте ТР-3 выполняют разборку, проверку деталей с целью выявления их пригодности для дальнейшей работы. Сборку специальных трансформаторов производят согласно требованиям сборочных чертежей.

Проверяют отсутствие короткого замыкания между витками, а также сопротивление изоляции между корпусом и выводными шинами, замеряют величину омического и индуктивного сопротивлений обмоток индуктивных шунтов, сглаживающих и переходных реакторов. Обмотки пропитывают лаком.

Заменяют изоляторы, изоляционные рейки и клицы, имеющие отколы и трещины длиной более 1 % пути возможного перекрытия. При нарушении покрытия катушек производят их окраску электроизоляционной эмалью.

8.2. Обслуживание аккумуляторных батарей

Щелочные аккумуляторные батареи. К *основным неисправностям* щелочных аккумуляторов относятся: снижение мощности; высокая температура электролита; снижение плотности электролита; уменьшение плотности и снижение электролита; загрязнение электролита вредными примесями; короткое замыкание в аккумуляторах; перетирание резиновых чехлов; трещины в корпусе аккумуляторных элементов и в перемычках; разрыв банок или пробок; повышенный саморазряд и газовыделение.

Снижение мощности наиболее часто происходит в летнее время из-за накопления в электролите карбонатов, уменьшающих содержание щелочи. Карбонаты накапливаются из-за углекислоты, поглощаемой из воздуха. При увеличении содержания карбонатов в 2,5—3 раза сверх нормы приводит к уменьшению емкости на 35—40 %.

С повышением температуры электролита во время эксплуатации железная активная масса начинает растворяться, негативно воздействуя на положительный электрод, при этом емкость снижается. При растворении активной массы образуется тонкая металлическая пленка, оседающая на пластинах и сепараторах при понижении температуры электролита, что приводит к повышенному саморазряду аккумуляторной батареи.

Уменьшение плотности ниже 1,19 г/см^3 вызывает быстрый рост удельного сопротивления электролита и, следовательно, снижение напряжения аккумулятора. Однако плотность больше 1,26 г/см^3 также вредна вследствие возрастания растворимости железа отрицательных пластин, особенно заметного при повышенной температуре.

Загрязнение электролита вредными примесями чаще всего происходит при заливке аккумуляторов недистиллированной водой, а также при попадании в отдельные аккумуляторы металлических предметов.

Короткое замыкание в аккумуляторах возникает чаще всего из-за большого количества шлама, который образуется при вымывании активной массы из электродов, а также при перетирании резиновых чехлов. Перетирание резиновых чехлов происходит из-за их непрочности, а также тогда, когда аккумуляторы закреплены в ящике деревянными клиньями, так как при движении ЭПС происходит вибрация ящика, приводящая к расшатыванию крепления. Неисправные пробки приводят к скоплению газов, в результате чего происходит выпучивание стенок сосуда, а в дальнейшем — их повреждение.

Приготовление электролита щелочных аккумуляторов. В щелочных кадмиево-никелевых аккумуляторах, работающих при температуре от −19 до +35 °С, применяют составной калиево-литиевый электролит плотностью 1,19—1,21 г/см^3, состоящий из раствора едкого калия с добавкой на 1 л 20 г едкого лития аккумуляторного (моногидрата лития). При температуре воздуха от −20 до −40 °С применяют раствор едкого калия плотностью 1,26—1,28 г/см^3.

При температуре воздуха от 10 до 50 °С применяют составной электролит плотностью 1,17—1,19 г/см^3, состоящий из раствора едкого натрия с добавкой едкого лития 15—20 г на 1 л.

При длительной стоянке электровоза при окружающей температуре ниже –40 °С подъем токоприемника целесообразно осуществлять с подачей сжатого воздуха от постороннего источника. При температуре воздуха от –20 до –40 °С допускается применять составной электролит плотностью 1,25—1,27 г/см^3. При этом емкость аккумулятора будет несколько ниже (на 5—10 %) по сравнению с его емкостью на калиевом электролите с такой же плотностью.

При отсутствии калиево-литиевого электролита допустимо применять составной электролит — раствор едкого натрия плотностью 1,17—1,19 г/см^3 с добавкой 20 г на 1 л едкого лития аккумуляторного; раствор едкого калия плотностью 1,19—1,21 г/см^3.

Эксплуатация щелочных аккумуляторов. С завода аккумуляторы поступают без электролита. Для приготовления электролита используют описанную выше технологию. Отстоявшийся электролит заливают в элементы, в течение 2 ч идет пропитка им активной массы пластин. После этого проверяют напряжение на элементе, если оно отсутствует, время пропитки постепенно увеличивают до 10 ч и снова проверяют напряжение. Если напряжения нет — элемент в эксплуатацию не допускают.

После пропитки пластин уровень электролита должен быть на 5—15 мм выше пластин, после чего электролит доливают — до уровня 50—60 мм. При зарядке аккумулятора считают, что величина зарядного тока щелочного аккумулятора составляет 25 % его емкости. Поэтому для аккумулятора 33КН-100 зарядный ток составляет 25 А (100 А·ч — емкость аккумулятора). После первой зарядки аккумулятор разряжают током 7,5 А в течение 4 ч. Эти циклы заряда и разряда при первом заряде повторяют 2—3 раза, после этого заряженная батарея готова к работе.

При техническом обслуживании ТО-2 измеряют, а при необходимости восстанавливают уровень электролита (норма для щелочных аккумуляторов — 50—60 мм над пластинами). Нагрузочной вилкой измеряют напряжение каждого аккумулятора. Аккумуляторы, имеющие напряжение менее 1,2 В, заменяют. Допускается при эксплуатации отключать один аккмулятор до очередного ТО-3.

На электропоездах при ТО-3 техническое обслуживание аккумулярной батареи проводят в соответствии с действующими инструкциями. Очищают подвесные изоляторы от пыли, грязи, снега. Осматривают ящик аккумуляторной батареи снаружи и проверяют подвесные болты; открывают крышку; проверяют состояние уплотнений, замков и вентиляционных каналов ящика. При необходимости уплотнения заменяют, замки ремонтируют.

Проверяют состояние элементов аккумуляторной батареи, в случае появления окисления контактных поверхностей смазывают контакты и перемычки. Проверяют напряжение элементов, уровень и плотность электролита каждого элемента.

Протирают крышки элементов и перемычки, прочищают вентиляционные отверстия, осматривают пробки элементов.

На электропоездах обслуживание и ремонт аккумуляторных батарей мало чем отличается от их обслуживания на электровозах.

При текущем ремонте ТР-1 выполняют те же работы, что и при техническом обслуживании ТО-3. Кроме того, проверяют состояние резиновых чехлов, вентиляционных каналов и ящиков аккумуляторной батареи. Измеряют сопротивление изоляции батареи относительно ящика и кузова вагона. При значении сопротивления изоляции ниже установленной нормы выявляют и устраняют причину пониженного сопротивления, после чего производят повторное измерение сопротивления изоляции.

При текущем ремонте ТР-2 снимают аккумуляторную батарею с электропоезда для промывки и ремонта. Осматривают ящик батареи, проверяют плотность прилегания крышки, состояние запоров, вентиляционных каналов. Устраняют выявленные неисправности. Промывают ящик, протирают насухо, внутреннюю поверхность ящика окрашивают щелочностойкой эмалью. При установке батареи банки протирают насухо, укрепляют в ящике уплотняющими прокладками.

Проверяют наличие изоляционных трубок на проводах и изоляционной втулки на выводе проводов из ящика, а также состояние проводящих проводов и пайки наконечников. Устраняют выявленные неисправности. Проверяют содержание карбонатов, плотность и уровень электролита.

Снятие аккумуляторной батареи для ремонта выполняют при нерабочем состоянии ЭПС. Перед снятием аккумуляторной бата-

реи необходимо выключить рубильник батареи или выключатели распределительного щита, а затем снять предохранители. Ящики предварительно очищают от пыли и грязи. После открытия крышки ящика аккумулятора приступают к работе спустя 6—8 мин. Протирают верхнюю часть банок и соединяющие их перемычки, после чего отсоединяют перемычки и подводящие провода и вынимают аккумуляторы из ящика. Снятую аккумуляторную батарею ставят на тележку и доставляют в аккумуляторное отделение, а взамен нее на ЭПС устанавливают отремонтированною аккумуляторную батарею.

При текущем ремонте ТР-3 в дополнение к работам, выполняемым при ТР-2, проверяют напряжение каждого аккумулятора.

Кислотные аккумуляторные батареи. В процессе эксплуатации у кислотных аккумуляторов возможны различные неисправности, в том числе такая, как течь банки, приводящая к быстрому падению уровня электролита. При обнаружении течи в пути следования элемент необходимо отключить, так как течь приводит к утечке тока и замыканию на «землю». Короткое замыкание между разнополюсными пластинами может произойти при повреждении сепараторов или образовании мостиков шлама между пластинами. Оно характеризуется понижением напряжения на элементе как при заряде, так и при разряде, понижением плотности электролита, которое не устраняется подзарядом, а также повышением температуры электролита.

В кислотном аккумуляторе электролитом является раствор серной кислоты летом плотностью 1,24—1,25 г/см^3, а зимой — 1,26—1,27 г/см^3 (для южных районов 1,24—1,25 г/см^3). Все аккумуляторы соединены последовательно. Контактные выводы и межэлементные соединения изготавливаются из меди или латуни, поэтому для предохранения от коррозии их покрывают свинцом.

В кислотных аккумуляторах часто возникает сульфатация, т.е. покрытие пластин кристалическим налетом, препятствующим взаимодействию электролита с пластиной. Основными причинами сульфатации могут быть недостаточный первоначальный заряд; систематически повторяющийся глубокий разряд; систематический недоразряд; применение электролита высокой плотности; систематические быстрые заряды большими токами; отсутствие своевременных восстановительных зарядов; низкий уровень электролита; внутрен-

ние короткие замыкания; загрязнения электролита вредными примесями; пониженная емкость элемента.

Сульфатация обычно устраняется тремя-четырьмя циклами так называемых лечебных разрядов по инструкции завода. При чрезмерной сульфатации производится заряд слабыми токами, а при запущенной сульфатации — заряд в дистиллированной воде. Для этого электролит сливают, заливают дистиллированную воду и выполняют зарядку.

При плохой изоляции возможен повышенный саморазряд, который также может быть вызван коротким замыканием и местными реакциями в элементах, вызникающими из-за примесей в электролите. Сопротивление изоляции батареи должно быть не менее 25 кОм; при меньшем сопротивлении возможны утечки тока.

Коррозия зажимов может появиться вследствие плохого подтягивания нижних контргаек при съеме и постановке зажимов и привести к значительному увеличению внутреннего сопротивления батареи. Для уменьшения коррозии резьбу зажимов смазывают вазелином.

При уменьшенной плотности электролита возможен недозаряд, который истощает элементы. Определить перезаряд можно по сильному газовыделению и повышению температуры электролита. Это ослабляет активную массу, способствуя образованию шлама, который может вызвать короткое замыкание в аккумуляторе.

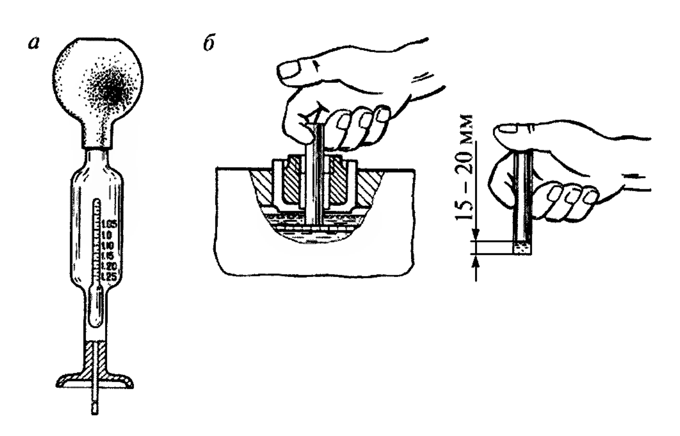


Рис. 8.1. Ареометр (*а*) и мерная трубка (*б*) для измерения плотности и уровня электролита кислотных батарей

Плотность электролита для кислотных батарей измеряют ареометром (рис. 8.1, *а*). Для измерения плотности через отверстие пробки аккумулятора засасывают грушей ареометра необходимое количество электролита и по шкале отсчитывают значение плотности. Уровень электролита снижается вследствие его интенсивного испарения при несвоевременной доливке дистиллированной воды; пластины оголяются, подвергаются коррозии и выходят из строя. Доливать дистиллированную воду необходимо перед зарядом батареи с тем, чтобы она могла смешаться с электролитом. Проверка уровня электролита производится мерной стеклянной трубкой с контрольными рисками (рис. 8.1, *б*) или специальным приспособлением.

8.3. Техника безопасности при работе с аккумуляторными батареями

К работам по обслуживанию аккумуляторных батарей допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование и специальное обучение, прослушавшие вводный инструктаж и инструктаж на рабочем месте, а также сдавшие экзамены на группу по электробезопасности не ниже третьей.

При обслуживании аккумуляторных батарей возможны воздействия опасных и вредных производственных факторов: химических, к которым относятся вредные вещества (серная кислота, щелочь, свинец); физических, таких как опасное напряжение электрической цепи, движущийся подвижной состав, повышенная или пониженная температура поверхностей оборудования и воздуха рабочей зоны (при обслуживании аккумуляторных батарей без снятия с ЭПС), возможность возникновения источников загорания с последующим воспламенением горючих материалов и жидкостей, повышенная или пониженная влажность или подвижность воздуха.

Работники, обслуживающие аккумуляторные батареи, обязаны:

– выполнять только ту работу, которая определена Инструкцией по эксплуатации оборудования или должностной инструкцией;

– знать и уметь использовать средства индивидуальной защиты;

– оказывать доврачебную помощь при несчастном случае;

– в случае травмирования известить своего непосредственного начальника о каждом несчастном случае.

Работники, обслуживающие аккумуляторные батареи, обеспечиваются специальными средствами и одеждой: противощелочно-кислотным костюмом, резиновыми сапогами, прорезиненными нарукавниками, прорезиненным фартуком, резиновыми перчатками, защитными очками и респиратором.

Внутри аккумуляторного отделения или вблизи него должна быть расположена раковина, возле которой должно находиться мыло, вата в упаковке, полотенце и закрытый сосуд с 5—10%-ным нейтрализующим раствором питьевой соды (1 чайная ложка на 1 стакан воды) — для кислотных батарей и готовые 10%- и 2%-ные растворы борной кислоты — для щелочных батарей.

На всех сосудах с электролитом, дистиллированной водой, содовым раствором или раствором борной кислоты должно быть четко написано наименование содержимого.

Щелочи (едкий натр и едкое кали), как в твердом состоянии, так и в виде растворов, при попадании на кожу вызывают ожоги. Поэтому при попадании на кожу необходимо быстро удалить их и промыть это место 10%-ным раствором борной кислоты. При попадании щелочи в глаза необходимо промыть их струей воды, а затем 2%-ным раствором борной кислоты, после чего срочно обратиться к врачу.

В случае попадания на кожу или в глаза серной кислоты немедленно смыть ее обильной струей воды, затем промыть 10%-ным раствором питьевой соды.

Не реже одного раза в год работники должны проходить обучение по оказанию первой помощи пострадавшим.

Перед началом работы работник, обслуживающий аккумуляторные батареи, должен получить задание на выполнение работы и пройти инструктаж на рабочем месте по специфике выполняемых работ, а также:

– включить приточно-вытяжную вентиляцию;

– надеть спецодежду и средства индивидуальной защиты;

– осмотреть и подготовить рабочее место: привести его в порядок; убрать мешающие предметы, рабочий инструмент, приспособления и вспомогательный материал разложить в удобном и безопасном порядке.

Следует также проверить комплектность пожарного инвентаря в аккумуляторном отделении и при недостатке такового сообщить об этом своему непосредственному начальнику.

Во время работы в аккумуляторном отделении запрещается курение, использование электронагревательных приборов, аппаратов и инструментов, при работе которых может возникнуть искрение.

Для осмотра аккумуляторов используют переносную лампу с предохранительной сеткой напряжением не выше 12 В или аккумуляторный фонарь. Шнур лампы должен быть заключен в резиновый шланг.

Присоединять клеммы аккумуляторов на зарядку и отсоединять их после зарядки необходимо при выключенном оборудовании зарядного устройства. При этом на руки должны быть надеты резиновые перчатки.

Для предотвращения замыкания аккумуляторов используют инструменты с изолированными ручками и торцевыми ключами с изолированными стержнями. Во время осмотра нельзя класть на аккумуляторы металлический инструмент и использовать открытый огонь.

Очень опасен гремучий газ, который образуется при заряде аккумуляторов. Искра может вызвать взрыв, поэтому необходимо, чтобы аккумуляторные ящики имели хорошую вентиляцию.

При эксплуатации никель-кадмиевых аккумуляторов необходимо помнить, что их положительный полюс соединен с корпусом аккумулятора. Нельзя пользоваться одной и той же посудой, ареометрами, мерными трубками, грушами для обслуживания и кислотных и щелочных аккумуляторов.

Поднимая и опуская щелочной аккумулятор в резиновом чехле, необходимо быть особенно внимательным, так как в чехле часто скапливается электролит и при резком опускании аккумулятора он фонтаном выбрасывается из-под чехла и может попасть в лицо. Кожу рук и одежду необходимо защищать от попадания кислоты, щелочи и электролита. Работу со щелочами и кислотами проводят в резиновых перчатках, защитных очках и резиновом фартуке.

Транспортировку аккумуляторных батарей осуществляют на специальных тележках, конструкция которых исключает возможность падения батарей.

Проверять степень заряженности аккумуляторных батарей следует только специальными приборами (нагрузочной вилкой, ареометром и т.п.).

Хранят серную кислоту только в специальных стекляных сосудах, находящихся в плетеных корзинах или деревянных ящиках, наличие бирок с наименованием содержимого обязательно. Пробки на сосудах должны быть плотно закрыты. Открывают стекляные сосуды с серной кислотой осторожно, не применяя больших усилий, предварительно прогрев горловину сосуда тряпкой, смоченной в горячей воде.

При приготовлении кислотного электролита необходимо соблюдать следующие меры предосторожности:

– смешивание серной кислоты и дистиллированной воды производят в специально предназначенной для этого посуде;

– для смешивания серной кислоты с водой сначала наливают в посуду холодную воду, а затем тонкой струей вливают кислоту, одновременно помешивая раствор стеклянной или эбонитовой палочкой;

– переливают кислоту из бутылей при помощи качалок, специальных сифонов или других устройств;

– переливать кислоту вручную, а также вливать воду в кислоту не допускается во избежания получения ожогов.

При приготовлении щелочного электролита следует соблюдать следующие меры предосторожности:

– сосуд со щелочью открывают осторожно без больших усилий;

– если пробка залита парафином, горло сосуда прогревают тряпкой, смоченной в горячей воде;

– приготовляют электролит только в стальной или в пластмассовой емкости.

Содержат кислоту, щелочь, электролит и дистиллированную воду в сосудах, имеющих специальные надписи.

После окончания работы электролит, приборы, инструменты должны быть убраны в отведенное для этого место. Туда же убирают бывшие в работе средства индивидуальной защиты (перчатки, фартук, сапоги), предварительно промыв их в воде. Обо всех недостатках, обнаруженных во время работы, необходимо известить своего непосредственного руководителя.

Контрольные вопросы

1. Назовите состав работ при ревизии тягового трансформатора.
2. Какие основные технологические операции выполняются при ремонте активной части трансформатора?

3. Какие неисправности могут иметь магнитопровод и расширитель?

4. Какова последовательность сборки трансформатора?

5. Какие вредные и опасные факторы воздействуют на человека при работе с аккумулятором?

6. Что необходимо выполнить перед началом работы в аккумуляторном отделении?

7. Как приготовить кислотный и щелочной электролит?

8. Что включает в себя техническое обслуживание аккумуляторов?

Рекомендуемая литература

1. Большая энциклопедия транспорта. Том 4. Железнодорожный транспорт. — М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. — 559 с.

2. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утверждены приказом Минтранса России от 21.12.2010 № 286. — М.: Трансинфо ЛТД, 2011. — 256 с.

3. ГОСТ 12232—89. Щетки электрических машин.

4. ГОСТ 21427—83. Сталь электротехническая тонколистовая.

5. ГОСТ 2582—81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия.

6. ГОСТ 15150—69. Машины, приборы и другие технические изделия, исполнения для различных климатических районов, категорий, условий эксплуатации, хранения, транспортировки в части воздействия климатических факторов внешней среды.

7. ГОСТ 15543-1—89. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам.

8. ГОСТ 12.0.003—74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

9. Руководство по среднему и капитальному ремонту электрических машин электровозов РД 103.11.320—2004. — М., 2004. — 192 с.

10. Правила по охране труда при эксплуатации локомотивов и моторвагонного подвижного состава в ОАО «РЖД». Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 24.04.2006 № 788р.

11. Правила по охране труда при эксплуатации локомотивов ОАО «РЖД». Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.2012 № 2753р.

12. Грищенко А.В., Козаченко Е.В. Новые электрические машины локомотивов: учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. — 271 с.

13. Дайлидко А.А. Электрические машины тягового подвижного состава: учебник для колледжей и техникумов железнодорожного транспорта. — М.: Желдориздат, 2002. — 404 с.

14. *Дайлидко А.А.* Метрология, стандартизация и сертификация: учебно-методическое пособие. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. — 352 с.

15. *Дайлидко А.А., Дайлидко О.А.* Электрические машины: учебное иллюстрированное пособие для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта. — М.: УМК МПС России, 2002. — 43 с.

16. Теория и конструкция локомотивов: учебник для вузов железнодорожного транспорта / Г.С. Михальченко, В.Н. Кашников, В.С. Косов, В.А. Симонов; под ред. Г.С. Михальченко. — М.: Маршрут, 2006. — 584 с.

17. *Кацман М.М.* Электрические машины: учебник для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования. — М.: Академия, 2003. — 496 с.

18. *Николаев А.Ю., Сесявин Н.В.* Устройство и работа электровоза ВЛ80^{с}: учебное пособие для учащихся образовательных учреждений железнодорожного транспорта, осуществляющих профессиональную подготовку / Под ред. А.Ю. Николаева. — М.: Маршрут, 2006. — 512 с.

19. *Собенин Л.А., Зайцев А.А., Чмыхов Б.А.* Организация, планирование и управление локомотиворемонтным производством: учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта / Под ред. Л.А. Собенина. — М.: Маршрут, 2006. — 439 с.

20. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав. Инструкция по применению смазочных материалов. 01ДК.421457.001И от 23.12.2005.

21. *Петропавлов Ю.П.* Технология ремонта электроподвижного состава: учебник для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта. — М.: Маршрут, 2006. — 432 с.

22. *Просвирин Б.К.* Электропоезда постоянного тока: учебное пособие. — М.: УМК МПС России, 2001. — 669 с.

Оглавление

Учебное издание

Дайлидко Антон Антонович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ЭПС

Учебное пособие

Подписано в печать 23.06.2015 г.
Формат 60×84/16. Печ. л. 15,25.
ФГБУ ДПО «Учебно-методическнй центр по образованию
на железнодорожном транспорте»
105082, Москва, ул. Бакунннская, д.71
Тел.: +7 (495) 739-00-30
e-mail: info@umczdt.ru
http://www.umczdt.ru